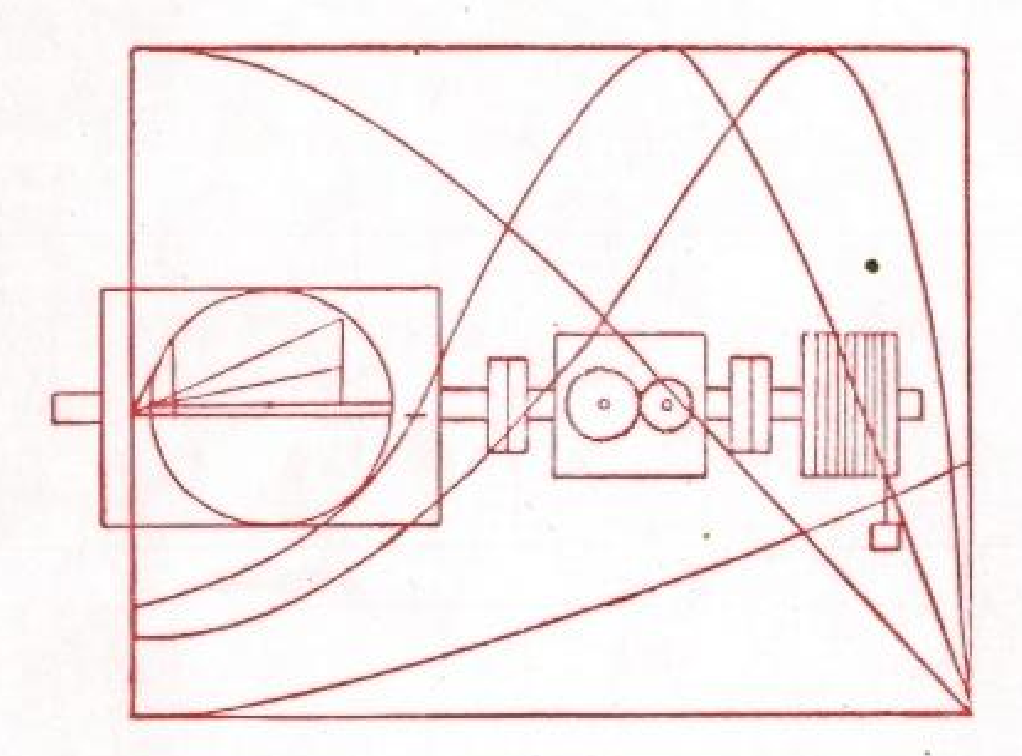
مجموعة الكتب الهندسية

المحركات التأثيرية

ومبادئ التحريك الكهربي



دكتور مهندس

محمد أحمد قمر

أستاذ الآلات الكهربية

ورئيس قسم الهندسة الكهربية

كلية الهندسة - جامعة الإسكندرية

الناشر منشأة المعارف بالإسكندرية

جلال حزي وشركاه

١٢١

المحركات التأثيرية

ومبادئ التحريك الكهربى

دكتور مهندس

محمد أحمد قمر

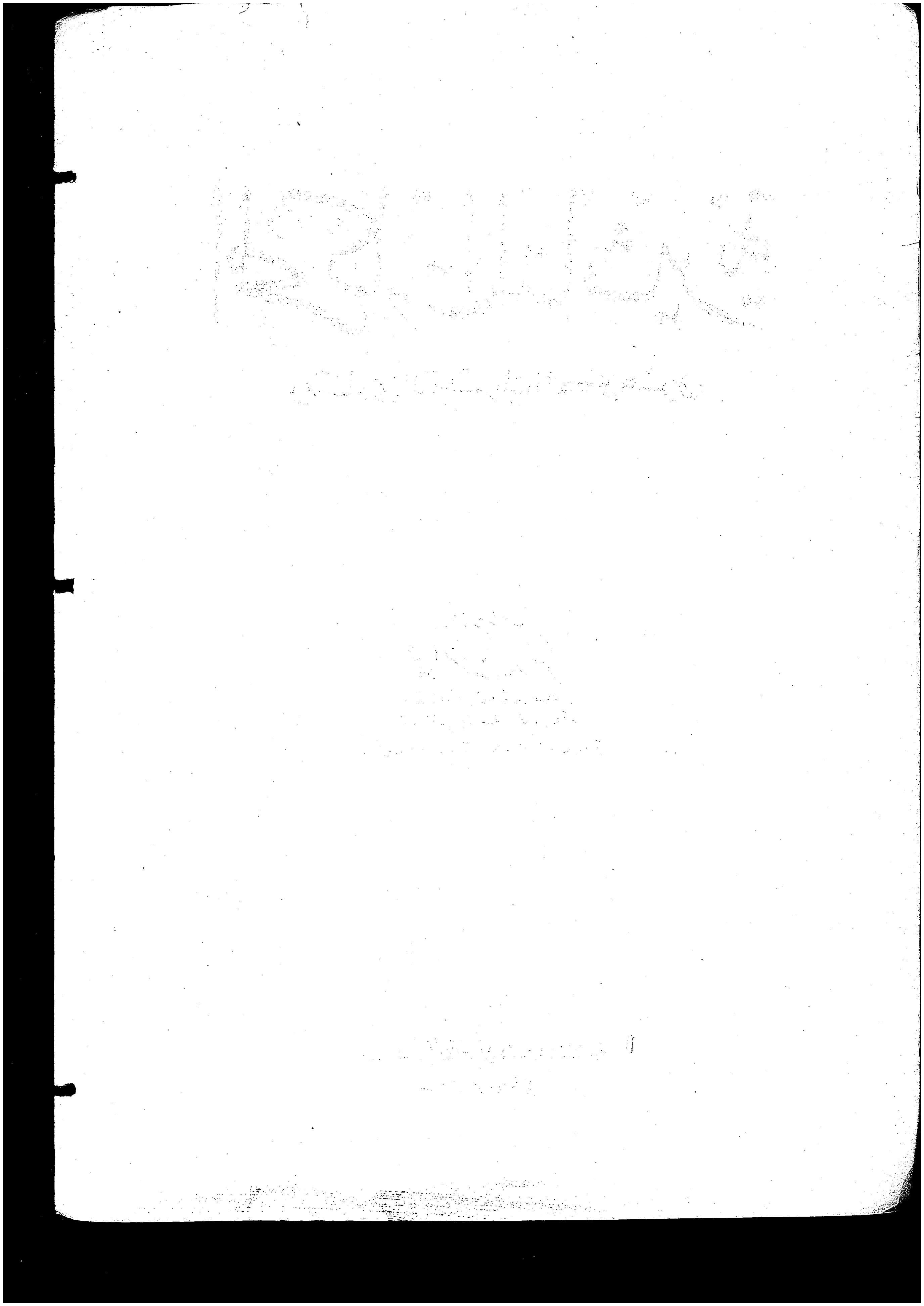
أستاذ الآلات الكهربية

ورئيس قسم الهندسة الكهربية

كلية الهندسة - جامعة الاسكندرية

الناشر منشأة المعارف بالاسكندرية

جلال حزى وشركاه



بسم الله الرحمن الرحيم

ربنا لا تؤاخذنا إن نسينا أو أخطأنا

صدق الله العظيم

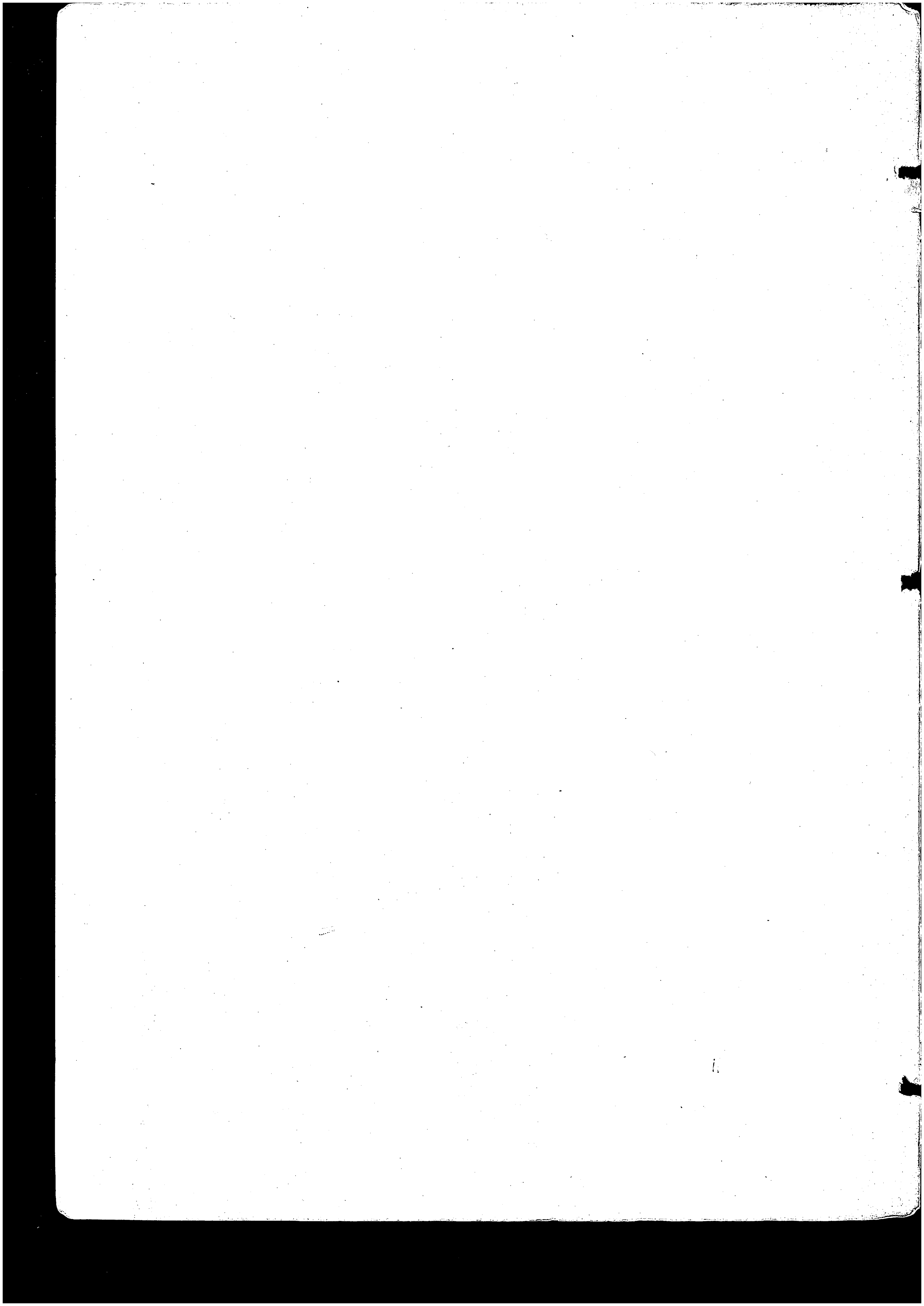
مقدمة الكتاب

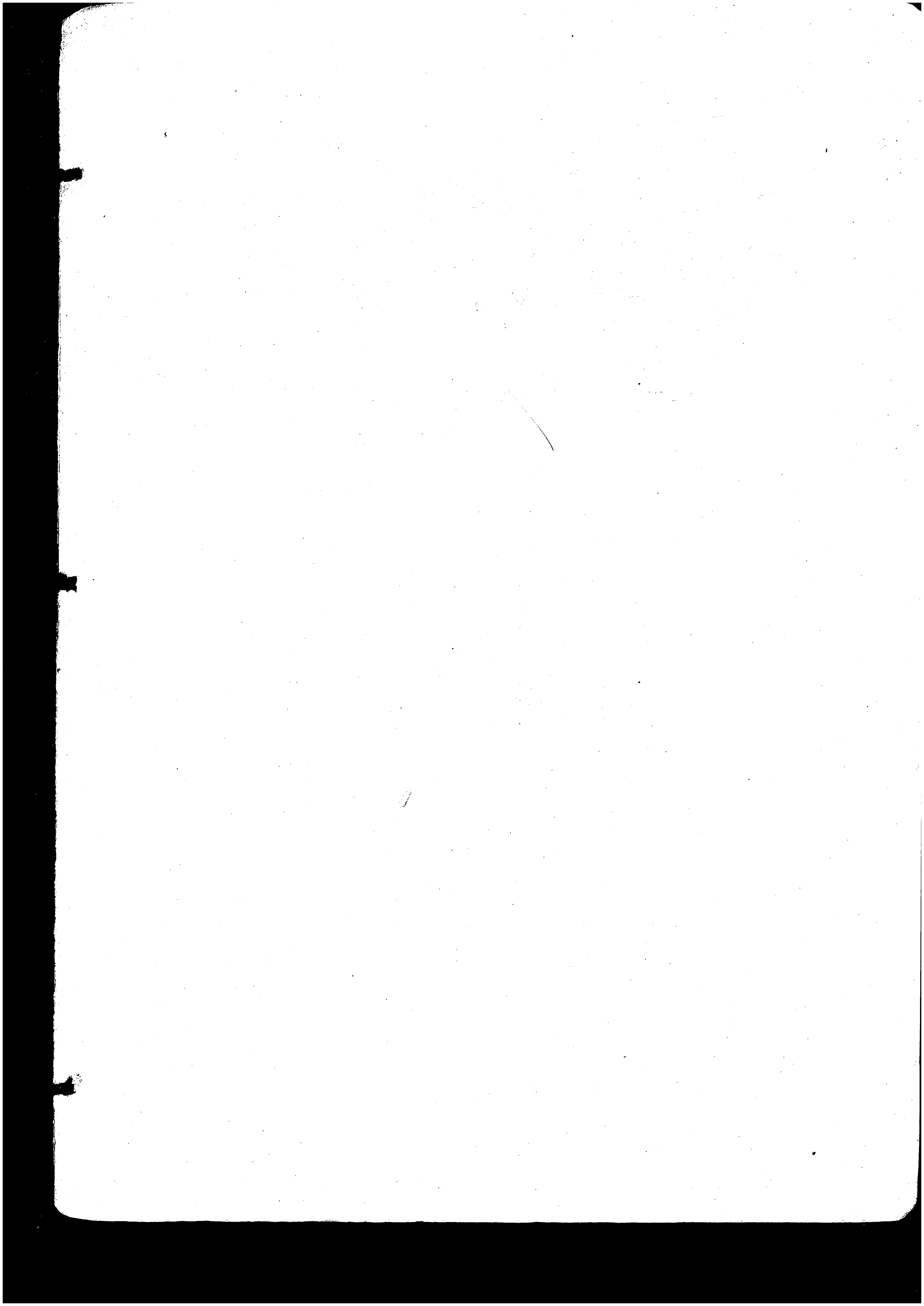
هذا هو الكتاب الثالث فى سلسلة الكتب ، التى تستهدف دراسة المعلومات الأساسية فى الآلات الكهربية ، والتى طلبت من الله أن يوفقنى فى تأليفها باللغة العربية ، وأسأله سبحانه وتعالى أن يعطينى القدرة على استكمالها قبل أن يحين الأجل ، فيسبغ على نعمة أن أترك من ورائى علم ينتفع به .

ولقد ظهر الكتاب الأول ، وهو هندسه الآلات الكهربية فى عام ١٩٧٢ ، ثم ظهر الكتاب الثانى وهو نظريات وتصميم الآلات الكهربية فى عام ١٩٧٣ . ولم يكن منى نشاط غير ملحوظ أن يظهر الكتابان الأولان فى عامين متتاليين ، كما أنه لم يكن تقاعس منى غير مقصود أن يتأخر ظهور الكتاب الثالث حتى عام ١٩٧٨ . فقد سبق البداية استعداد وتحفز تراكم معها عمل دائب طوال سنين ، كما أنه كان ولا بد من فترة تروى ، تستجمع فيها الأنفاس ، ويشاهد خلالها خط التجربة من النجاح ، فاما الاقدام بناء على ذلك ، أو التذرع بالصمت الحكيم .

ثم ظهر أن التجربة كانت والحمد لله ناجحة نجاحاً كبيراً ، وتزايد الطلب على المؤلفين فى الفترة الأخيرة ، مما زاد من تحمسي لاخراج المؤلف الثالث ، كما تأكد اقتناعى بمدى ما يمكن أن يعود على أبنائنا من فائدة عظيمة إذا ما درسوا العلوم التكنولوجية بلغة امهاتهم التى اتقنوها ، ودرجوا على فهمها واستخدامها فى التعبير عن أفكارهم ، منذ أن شبوا عن الطوق .

وقد قلت فى بحث فى موضوع الترجمة والتأليف والتعليم باللغة الوطنية ، قرأته فى المؤتمر الأول للتضامن الاسلامى فى مجالات العلم والتكنولوجيا ، الذى انعقد فى مدينة الرياض بالمملكة العربية السعودية أثناء شهر ربيع الأول من عام ١٣٩٥ هـ :





«إن الكتاب سفير صامت، ولكنه مفصح ومبين . وهو يمكن أن يكون واسع الانتشار ، سهل التداول ، كما يمكنك أن تصل ، بما يحتوى عليه من رأى وفكر ، إلى عقول أناس قد أقيم بينك وبينهم ستار بأى شكل ، وبأى طريق . وقد يكون الكتاب فى حد ذاته احدى طرق التعليم الفعالة، وهو معلم يسهل التعامل معه ، ولكن لا يتيسر استيعاب ما يحتويه من معلومات إلا بعد اتقان اللغة التى كتب بها اتقانا تاما . وقد أصبحت الكتب العلمية والتكنولوجية ، على هذا الاساس ، وسيلة لنشر اللغات القومية ، وهكذا فأصبح العرف السائد بين الاقوام الناطقين بلغات مختلفة ، ان كنت تريد أن تستفيد من تقدمنا العلمى والتكنولوجى ، فلتتعلم لغتنا وتتقنها أولا ، وقبل كل شيء . وحرام علينا أن نحرم لغتنا العربية الاصيلة من هذه الوسيلة الفعالة ، لنشرها والدعاية لها ، بأن ننصرف الى تأليف الكتب باللغات الأجنبية ، فى المجالات العلمية والتكنولوجية التى نقدر عليها ، وما أكثر ما نقدر عليه والحمد لله فى هذا السبيل » .

كما قلت أيضاً، ان الشعوب تميل بفطرتها الى التمسك بلغاتها القومية ، والاعتزاز بها والعمل على احياء تراثها ، لو كان لها تراث ، وانمائها ، بالتأليف بها فى مختلف نواحى العلوم والفنون والآداب، والترجمة اليها من اللغات الاخرى على قدر الإمكان وقد سمع عن جدال ثار بين قوم آخرين، مثل ذلك الذى ثار ومازال قائما بيننا ، فى هذا السبيل . ولعل هذا يرجع الى اهمية اللغة العربية ، بالنسبة للغات الأخرى المعروفة ، وكونها لغة حضارة توطدت أركانها ردحا طويلا من الزمان ، وكانت من الحضارات التى أثرت كل التأثير فى مصير الإنسان ، ثم قوى أعداؤها ، وأصبحوا ذوى حول وقوة ، واستعمروا بلاد الناطقين بها ، وقد حاولوا ، ومازالوا يحاولون ، حتى بعد جلائهم عن هذه البلاد ، أن تموت هذه اللغة ، وتصبح أثرا من الآثار ، وهذا هو ما تنعقد حوله آمالهم من قديم الزمان».

لقد اتخذت الجامعات العربية فى اجتماعات عديدة قرارها ، الذى لم يتغير ، بأن يكون التدريس باللغة العربية ، ومازال الكثيرون متمسكين بأهداب التدريس باللغة الانجليزية ، زعماً منهم بعدم وجود المراجع الكافية باللغة العربية. ولعمرى متى نهتم بتنفيذ قراراتنا باتخاذ الخطوات الحاسمة التى تضمن سرعة هذا التنفيذ ، ولن يكون ذلك إلا بثورة تأليف باللغة العربية ، كما فعل قبلنا بلغتهم قوم آخرون.

هذا ولقد سرت على نفس النمط فى تأليف هذا الكتاب ، كما فعلت فى الكتابين السابقين ، من حيث طريقة عرض الموضوعات وتسلسلها واتباع كل موضوع بالامثلة المحلولة التى تساعد على فهمه واستيعاب التطبيقات الخاصة به ، حتى تكون الدراسة على أساس تكنولوجى سليم.

ولا يسعنى فى ختام هذه الكلمة الا أن أذكر بالتقدير الجهد الكبير ، الذى يبذله الناشر منشأة المعارف بالاسكندرية (جلال حزى وشركاه) ، فى مساعدتى على أداء المهمة الكبيرة التى أنطت نفسى بها ، وأن أشكر رجال مطبعة الجيزة على ما قاموا به فى هذا السبيل ، وكل من عاون فى اخراج الكتاب بشكله الراهن.

نسأل الله أن يلهمنا الهداية والصواب فى كل ما نعمله ، انه سبحانه وتعالى ولى التوفيق.

الاسكندرية فى شهر رمضان ١٣٩٨ الموافق أغسطس ١٩٧٨.

دكتور محمد احمد قمر

الباب الأول

المبادىء الأساسية للمحركات التأثيرية ثلاثية المراحل

(Basic principles of three phase induction motors)

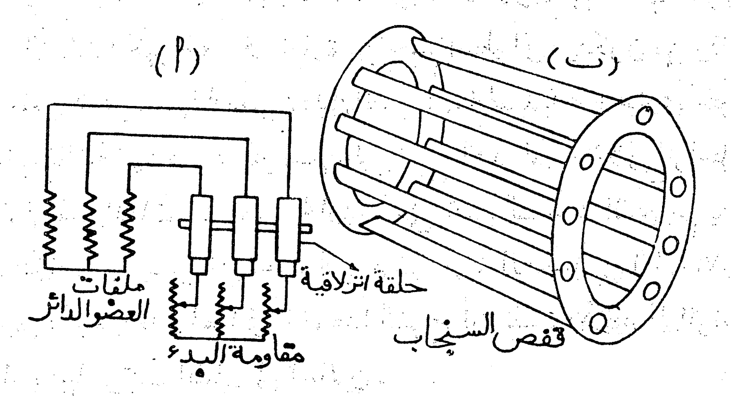
(١ – ١) تكوين المحرك التأثيرى ثلاثى المراحل :

(Construction of the 3 - phase induction motor)

يتكون المحرك التأثيرى ثلاثى المراحل، أساسا ، من عضو ثابت (stator) وعضو دائر (rotor) . ولا يختلف العضو الثابت للمحرك ، فى مظهره العام (general appearance) ، أو من حيث تركيب أجزائه المختلفة ، عن العضو الثابت للآلة المتزامنة ، كما سبق وصفه فى الباب الأول من كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربائية . فهو عبارة عن جسم اسطوانى، يتكون من رقائق الحديد المعزولة عن بعضها البعض لتقليل المفقودات الحديدية ، به مجارى تحتوى على ملفات ثلاثية المراحل ، لتوصيلها إلى ينبوع التيار المتردد ثلاثى المراحل . ويكون ترتيب الملفات ، فى هذه المجارى ، على نفس النمط ، الذى يتم به فى الآلات المتزامنة ، و بنفس القواعد ، التى تم شرحها بالتفصيل فى الباب الأول الذى سبق ذكره وقد راعينا فى أثناء هذا الشرح أن نلفت الأنظار إلى المواطن التى يختلف فيها ترتيب الملفات فى الحالتين .

أما بالنسبة لتكوين العضو الدائر ، فيوجد نوعان مختلفان فى تكوينهما ، وإن كانت خواصها الكهربية متقاربة جداً . ويتسمى المحرك عادة باسم عضوه الدائر ، للتمييز بين نوعين من المحركات التأثيرية ثلاثية المراحل ، هما المحركات ذات الحلقات الانزلاقية (Slip-ring motors) ، والمحركات ذات القفص السنجابى (Squirrel-cage motors) . ويتكون العضو الدائر فى المحركات ذات الحلقات الانزلاقية من جسم اسطوانى من رقائق الحديد ، المعزولة عن بعضها البعض ، به مجارى ، ويشبه فى تكوينه ، على هذا النحو ، المنتج فى آلة

التيار المستمر . وتحتوى المجارى ، فى هذه الحالة ، على ملفات ثلاثية المراحل ، يتم ترتيبها فى المجارى على نحو مماثل لترتيب الملفات فى العضو الثابت ، ويخضع لنفس القواعد . لذلك يطلق على مثل هـذا العضو الدائر أحيانا اسم العضو الدائر الملفوف (Wound rotor) . ويكون توصيل المراحل فى ملفات العضو الدائر على شكل دلتا أو نجمة ، على حسب الأحوال ، كما توصل الأطراف ، فى الحالتين إلى ثلاث حلقات انزلاقيـة ، راكبة على نفس عمود الادارة (shaft) للمحرك ، وتدور معه ، ومن ثم جاءت تسمية هذا النوع من المحركات بأنها ذات الحلقات الانزلاقية . ويمكن توصيل ملفات العضو الدائر ، بناء على ذلك ، إلى أية دائرة خارجية ثلاثية المراحل (3 - phase external circuit) ، مثل مقاومة ثلاثية المراحل شكل (١ - ١ ا) ، عن طريق الفرش الراكبة فوق الحلقات الانزلاقية .



(شكل ١ - ١)

وبذلك يمكن تغيير خواص تشغيل هذا النوع من المحركات ، على نطاق واسع ، عن طريق الدوائر الخارجية المختلفـة ، التى يتم توصيلها إلى ملفات العضو الدائر ، ويمكن التحكم فى مكوناتهـا على النحو المطلوب ، كما سيرد ذكره فيما بعد .

أما النوع الآخر من المحركات التأثيرية ، وهى ذات القفص السنجـابى ،

فان عضوها الدائر يتكون من جسم اسطوانى من رقائق الحديد ، و به مجارى ، على النحو السابق وصفه فى النوع الأول . ولـكن ، بدلا من الملفات ثلاثية المراحل ، التى توجد فى مجارى النوع الأول ، تمتلىء هذه المجارى بقضبـان (bars) ، من النحاس أو من الألومنيوم ، تصب فيها عادة ، و تتصل أطرافها ، من كل ناحية ، بحلقة متينة (stout ring) من نفس معدن القضبـان ، بحيث تشبه القضبان والحلقتان ، فى تـكوينها على هذا النحو ، قفص السنجاب (Squirrel cage) ، شكل (١ – ١ ب) . ومن ثم جاءت تسمية هـذا النوع من المحركات بأنها ذات القفص السنجابى . ولا يمكن ، بعد اتمام صنـع هذا النوع من المحركات ، التوصل إلى قفص السنجاب ، وربطه بأية دائرة خارجية . لذلك يكون تغيير خواص تشغيل هذا النوع من المحركات التأثيرية ، عندما يراد ذلك ، عن طريق العضو الثابت ، حيث لا توجد وسيلة للوصول إلى قفص السنجاب (there is no accomodation to the Cage) ، بعد اتمام صنع المحرك . وفى مقابل ذلك ، فان قفص السنجاب يتوائم مع أى عدد من الأقطـاب ، أو المراحل ، لملفات العضو الثابت ، ويعطي المحرك ، فى هـذه الحالة الخواص الكهربية للمحرك ذى الحلقات الانزلاقية المناظر الذى يحتوى علي عضو ثابت مماثل .

(٢ – ١) طريقة عمل المحرك ، بدون حمل :

(Method of operation of the motor without load)

عند توصيل ملفات العضو الثابت ، ثلاثية المراحل ، إلى ينبوع تيار متردد ثلاثى المراحل ، يتولد مجال مغناطيسى دائر ، بنفس الطريقة التى تم شرحها فى حالة المحرك المتزامن ثلاثى المراحل ، يدور بسرعة التزامن n_s لفة فى الدقيقة ، التى ترتبط بتردد الينبوع f ذبذبة فى الثانيـة وعدد أزواج الأقطاب p الذى أعدت علي أساسه الملفات ، بنفس العلاقة المعروفة $f = \frac{pn_s}{60}$. ويكون هذا المجال المغناطيسى الدائر متشابكا مع كل ملفات العضـو الثابت وملفات العضو

الدائر (أو قضبان قفص السنجاب) للمحرك ، وهو يشبه فى طبيعة عمله المجال المغناطيسي المتبادل بين الملف الابتدائى والملف الثانوى للمحول .

وفى الواقع أن المحرك التأثيرى ، بتركيبه الذى سبق شرحه ، لا يفترق عن المحول إلا فى اختلاف تكوين الدائرة المغناطيسية ، التى تحتوى فى هذه الحالة على ثغرة هوائية كبيرة ، وهى تلك التى توجد بين العضو الثابت والعضو الدائر . وتكون ملفات العضو الثابت هى الملفات الابتدائية ، التى توصل إلى الينبوع ، وملفات العضو الدائر هى الملفات الثانوية ، التى تكون مقصورة على نفسهـا ، فى الأحوال العادية لتشغيل المحرك ، أو من خلال دائرة كهربية ، ذات ترتيب خاص ، لتعديل خواص تشغيل المحـــرك ، وذلك فى حالة المحركات ذات الحلقات الانزلاقية ، كما سبق ذكره . ويمكننا أن نعتبر أن المحرك يعمل ، على هذا النحو ، على نمط محول ذى ملف ثانوى مقصور ، ونستفيد من نظريات المحول ، التى استنبطاها فى هذا المضمار ، وبالأخص على أساس وجود دائرة مكافئة كما سيرد ذكره فيما بعد .

إذا فرضنا أن الضغط المرحلى للينبوع ذو شكل جيبى ، وأن تيار المغطسة الذى يمر فى ملفات المحرك ، عندما يدور بدون حمل ، ذو شكل جيبى أيضا ، بمعنى أننا سوف نهمل التوافقيات الزمنيـة فى منحنى التيار ، فاننا نحصل على فيض مغناطيسي ذى توافقيـة أساسية تدور فى الاتجـــاه الموجب بسرعة التزامن n_s ، وتوافقيات عالية ذات سرعات متباينة ، كما تم شرحه على أساس المعادلة (٥ ـ ٣) صفحة ١٠٩ من كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربائية . وسوف نهمل هـذه التوافقيات العالية ، فى الوقت الراهن ، ونـكتفى بشرح طريقة عمل المحرك ، وخواصـــه الكهربائية ، على أساس وجود الفيض المغناطيسي للتوافقية الأساسية ، تسهيلا للأمور ، ولأن تأثير التوافقيات العالية لا يكون ذا أهميـة تذكر ، إلا فى حالات خاصة تتغير فيهـا خواص تشغيل المحرك تغيراً ملحوظاً ، وسوف نتناولها بالتفصيل فى حينها المناسب . هذا ،

وسوف نبنى كل النظريات القادمة على أساس أن الفيض المغناطيسي للتوافقية الأساسية لمنحنى القوة الدافعه المغناطيسية لملفات المنتج ، وهو الذى يدور فى الاتجاه الموجب بالنسبة لهذه الملفات بسرعة التزامن n_s لفة فى الدقيقــة ، هو فيض متبادل ، يتشــابك مع ملفات العضو الثابت ، وملفات العضو الدائر ، تشابكا تاما ، وقيمته ϕ_m خط لكل قطب ثابتة تماما ، ولا تتأثر بالحمل .

تتولد ، بناء على ذلك ، قوة دافعة كهربية مضاده E_1 ، في كل مرحلة من ملفات العضو الثابت ، تكون قيمتها ، على حسب المعادلة (٢ ــ ٢) صفحة ٥٦ ، من كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية ، كما يأتى :

$$E_1 = 4.44 \, f_1 \, T_1 \, \phi_m \, k_{w1} \times 10^{-8} \quad V \qquad (١ - ١)$$

حيث T_1 هى عدد اللفات في كل مرحلة من ملفات العضو الثابت ، f_1 تردد اليذبوع بالذبذبة فى الثانية $\left(\frac{pn_s}{60}\right)$ و k_{w1} معامل اللف فى العضو الثابت .

عندما يــكون العضو الدائر فى حالة السكون (rotor at standstill) ، لأول وهلة ، فان نفس الفيض المغناطيسي ϕ_m يدور بسرعة التزامن n_s بالنسبة لملفاته ، فيولد فيهــا قوة دافعة كهربية سكونية (أى والعضو الدائر فى حالة السكون) مقدارها E_{20} (Standstill e. m. f.) ، نحصل عليها باستخدام نفس المعادلة ، باعتبار أن T_2 هي عدد اللفات فى كل مرحلة من ملفات العضو الدائر (فى حالة قفص السنجاب توجد قيمــة مكافئة لـ T_2) و k_{w2} معامل اللف فى العضو الدائر ، حيث :

$$E_{20} = 4.44 \, p \frac{n_s}{60} T_2 \, \phi_m \, k_{w2} \times 10^{-8} = 4.44 \, f_1 \, T_2 \, \phi_m \times k_{w2} \times 10^{-8} \qquad (١ - ٢)$$

ويكون تردد E_{20} ، وتردد التيار الناشىء عنها هو $f_{20} = p\frac{n_s}{60}$ مساويا لتردد اليذبوع f_1 .

نظراً لأن ملفات العضو الدائر تكون مقصورة (و بالمثل قفص السنجاب بطبيعة تكوينه) يتولد تيار تأثيرى (بفعل القوة الدافعة الكهربية E_{20} الناتجة بالتأثير ، ومن ثم جاء اسم المحرك) ، فتصبح موصلات العضو الدائر (أو قضبان قفص السنجاب) الحاملة لهذا التيار التأثيرى موجودة فى هذا المجال الدائر ϕ_m ، فينشأ عزم دوران معين على هذه الموصلات ، تتوقف قيمته على قيم التيارات المارة فى هذه الموصلات ، وعلى ϕ_m ، وكذلك زاوية الاختلاف المرحلي بينهما . و بتطبيق قانون لنز ، للحصـــول على اتجاهات التيارات فى الموصلات، ثم تحديد اتجاه عزم الدوران الناشىء ، بناء على ذلك ، سوف تجد أن عزم الدوران هذا يعمل على إدارة العضو الدائر للمحرك فى نفس اتجاه دوران المجال المغناطيسي الدائر. بذلك نجد أن العضو الدائر قد أصبح يدور في اتجاه دوران المجال المغناطيسي الدائر ، وسوف يؤدى ذلك إلى نقص قيمة السرعة التى يدور بها المجال المغناطيسى الدائر بالنسبـة لملفات العضو الدائر ، كلما ازدادت سرعة دوران هذا العضـــو . وتكون السرعة النسبية للمجال المغناطيسى الدائر مع ملفات العضو الدائر، عند سرعة معينه n لفة فى الدقيقة ، ($n_s - n$).وهذه السرعة النسبية ، منسوبة إلى سرعة التزامن n_s ، تعطى ما يسمى بمعامل الانزلاق ، أو الانزلاق (slip) الذى يلعب دوراً كبيراً فى تحـديد خواص تشغيل المحرك ، كما سنرى فى التحليلات القادمة . ويرمز للانزلاق عادة بالرمز s ، كما يمكن أن نحصل أيضا على الانزلاق المئوى % s ، حيث

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad , \quad s\% = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100 \qquad (\text{١ - ٣})$$

وعندما يصل العضو الدائر إلي سرعة معينة n ، وهى تقابل انزلاق معين s ، على حسب المعـــادلة (٣ - ١) ، تصبح سرعة المجال المغناطيسى الدائر بالنسبة لملفات العضو الدائر ($n_s - n$) لفة فى الدقيقة ، بعـد أن كانت n_s عندما كان العضو الدائر فى حالة السكون . بذلك تتأثر قيمـة القوة الدافعة الكهربية المرحلية ، المنتجة بالتأثير فى ملفات العضو الدائر ، وكذلك ترددها

بنفس النسبة . فاذا رمزنا لقيمة القوة الدافعة الكهربية المرحلية في ملفات المنتج عند السرعة n ، أو الانزلاق s ، بالرمز E_{2s} ، وترددها (وتردد التيارات التأثيرية الناشئة عنها أيضا) بالرمز f_{2s} ، نجد ، بناء على ذلك ، أن :

$$\frac{E_{2s}}{E_{20}} = \frac{n_s - n}{n_s} = s \quad , \quad E_{2s} = sE_{20} \qquad (١ - ٤)$$

$$\frac{f_{2s}}{f_{20}} = \frac{f_s}{f_1} = \frac{n_s - n}{n_s} = s \quad , \quad f_{2s} = sf_1 \qquad (١ - ٥)$$

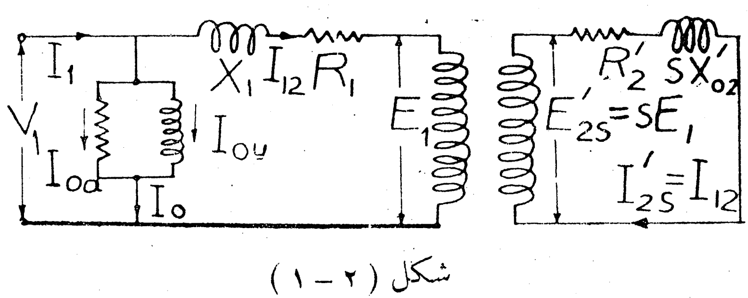
سوف نرى ، من التحليلات الرياضية المقبلة ، أن الاستطراد الطبيعى بعد ذلك ، هو زيادة سرعة المحرك إلى حد معـــين ، يمكننا تعيينه بتحليل الأمور بشكل عام ، متجاوزين عن بعض الحقائق ، التى لا تؤثر على النتيجة النهائية التى نريد الحصول عليها ، وذلك على النحو التالى : بازدياد سرعة العضو الدائر n تقل قيمة E_{2s} ، وتقل بالتالى قيمة التيار التأثيرى الناشىء عنهـا فى الملفات المقصورة ، حتى تصل n إلى قيمـة قريبة من n_s ، حيث تـكون قيمة عزم الدوران الناتج من تفاعل التيار التأثيرى مع Φ_m قد أصبحت فى تناقص مستمر ، فيتوقف ازدياد السرعة n عند الحد الذى يصبح فيه عزم الدوران هـذا كافياً لإدارة المحرك ضد عزم الدوران الناشىء عن المفقودات فى المحرك بدون حمل . وفى الحقيقة نجد أن n تصبـح فى هذه الحالة قريبـة جداً من n_s ، لدرجة أن الفرق بينهما يعطى انزلاقا مئويا صغيراً جداً ، تختلف قيمته من 1 % إلى 2 % تقريباً فى المحركات الصغيرة أو متوسطة الحجم ، وقد يصل 0.5% فى المحركات الكبيرة . لا يختلف مخطط المتجهات للمحرك (على أساس القيم المرحلية) فى شيء عن مخطط متجهات المحول وهما بدون حمل ، وذلك مع التجاوز عن وجود تيار صغير جداً فى الملف الثانوى (على العضو الدائر) للمحرك ، نهمل تأثيره على التيار الابتدائى فى هذه الحالة . وإلى جانب ذلك فاننا نستطيع أن نعتبر ، فى أحيان كثيرة ، أن سرعة دوران المحرك ، وهو بدون حمـــل ، هى سرعة التزامن n_s تقريباً .

(٣ – ١) طريقة عمل المحرك ، بالحمل :

(Method of operation of the motor on load)

عندما يكون المحرك دائراً بدون حمل ، ثم يوضع حمل على عمود الادارة (لإدارة مخرطة أو مضخة مثلا) فان التجاوب الطبيعى (natural response) أن تقل سرعة عمود الادارة ، و بالتالى سرعة العضو الدائر للمحرك ، نتيجة لتأثير عزم دوران الحمل المضاد ، الذى يمثل عزم دوران تقصير في هذه الحالة . وهذا يعنى ، بناء على ما سبق شرحه في حالة اللاحمل ، أن قيمة التيار التأثيرى في ملفات العضو الدائر سوف تزداد ، مما يؤدى إلى زياده عزم الدوران الذى يبذله المحرك على عمود الادارة . ونقل سرعة المحرك ، و تزداد بالتالى قيمـــة الانزلاق ، إلى الحد الذى يصبح فيه عزم دوران المحرك مساويا لعزم دوران الحمل وعزم دوران المفقودات معا، حيث تستقر الأمور على هذا الوضع المتزن. هذا ، وسوف نجد فيما بعد أن الانزلاق لايزداد بصورة كبيرة عند وضـع الحمل ، إذ لا تتجاوز قيمته حينئذ حوالى ٣٪ إلى ٥٪ فى المحركات متوسطة الحجم والصغيرة ، كما أنها قد لا تزيد عن حوالى ٢٪ في المحركات الكبيرة.

لكى يمكننا متابعة التطورات التى تحدث فى العوامل المختلفـة في المحـرك ، عند وضع الحمل ، بصورة أكثر دقة ، وأكثر تفصيـــلا ، نستعين بالدائرة المكافئة للمرحلة الواحدة في المحرك ، المبينـــة في شكل (٢ – ١) والتى نستنبطها ، مهتدين بما سبقت دراسته في حالة المحول ، على النحو التـالى :



شكل (٢ – ١)

R_1 هى المقاومة المرحلية لملفات العضو الثابت، و X_1 هى ممانعة التسرب المرحلية لنفس هذه الملفات، وهى محسوبة على أساس الفيض المتسرب حول ملفات العضو الثابت ΦL_1 ، الذي يتشابك مع ملفات العضو الثابت، ولا يتشابك مع ملفات العضو الدائر ، كما سبق بالنسبة للمحول . X_o و R_o هما مركبتا معاوقة التمغطس ، التى نضعها من باب التقريب ، كما فعلنا فى حالة المحول ، على طرفى الينبوع ذى الضغط المرحلى V_1 ، ويكون التيار المرحلى I_{oa} المار فى R_o هو تيار المفقودات الحديدية ، و I_{ou} المار فى X_o هو تيار المغطسة المرحلي ، بحيث يتكون منهما تيار اللاحمل I_o ، تماماً كما رأينا في حالة المحول .

* يكون التيار المرحلى I_{12} هو مركبة تيار الحمل المرحلي I_1 ، التى تمر فى ملفات العضو الثابت لمعادلة الفيض المغناطيسى الناشيء عن التيار المرحلى التأثيرى المار فى ملفات العضو الدائر ، لكى لا يتأثر الفيض المتبادل Φ_m . وتختلف قيمتا التيارين فى حالة المحرك بسبب اختلاف عدد اللفات فى مرحلتى العضو الدائر والعضو الثابت كما فى حالة المحول ، كما تختلفان فى حالة المحرك علاوة على ذلك بسبب اختلاف معاملى اللف k_{w_1} و k_{w_2} . وسوف نضطر إلى عمل الدائرة المكافئة للمحرك على مرحلتين : فى المرحلة الأولي نجد أن القوتين الدافعتين الكهربيتين ، على طرفي الملفين الابتدائى والثانوى ، تظلان مختلفتين في القيمة ، بسبب دوران العضو الدائر ، مما يجعلنا نحصل على دائرة مكافئة يكون فيها $T_1 k_{w_1} = T_2' k'_{w_2}$ ، بمفهوم الدائرة المكافئة للمحول ، ومع ذلك لا يمكننا وصل كل طرفين متناظرين من أطراف الملفين الابتدائى والثانوى، والاحتفاظ بهما منفصلين ، على نحو ماهو مبين فى شكل (٢ - ١) . وفى هذه المرحلة للدائرة المكافئة نجد ن تيار الحمل المرحلي فى ملفات العضو الدائر منسوباً إلى ملفات العضو الثابت I'_s يساوى I_{12} . ونحصل على I'_{2s} من I_{2s} ، وهو التيار المرحلى فى ملفات العضو الدائر ، علي نحو ما فعلناه فى حالة المحول ، أى أن $I'_{2s} = I_{2s} \frac{T_2 k_{w_2}}{T_1 k_{w_1}}$ [$k_{w_1} = k_{w_2}$ فى حالة المحول لأن الملفات متمركزة (Concentrated windings) وليست ملفات

موزعة (distributed windings)]. كذلك نجد أن العلاقة بين حدود الملف الثانوى ، المنسوبة إلى الملف الابتـــدائى ، كما جاءت فى شكل (٢ ـ ١) ، وحدوده الأصلية ، هى نفس العـــلاقة ، التى سبق شرحها بالتفصيل فى حالة المحول ، حيث يكون :

$$E'_{2s} = E_{2s} \frac{T_2{}'k'w_2}{T_2\, k_{w_2}} = sE_{20} \frac{T_1\, k\ \ w_1}{T_2\, k_{w_2}} = sE'_{20}$$

$$\frac{E'_{20}}{E_1} = \frac{T_2{}'k'w_2}{T_1\ k\ w_1} = 1 \quad (\, T_2{}'k'w_2 = T_1\, k_{w_1},\ n = o\,)$$

$$E'_{20} = E_1 \quad , \quad E'_{2s} = sE_1 \qquad (١ - ٦)$$

$$R'_2 = R_2 \left(\frac{T_1\, kw_1}{T_2\, k_{w_2}} \right)^2 \quad , \; X'_{20} = X_{20} \left(\frac{T_1\, k_{w_1}}{T_2\, k_{w_2}} \right)^2 \qquad (١ - ٧)$$

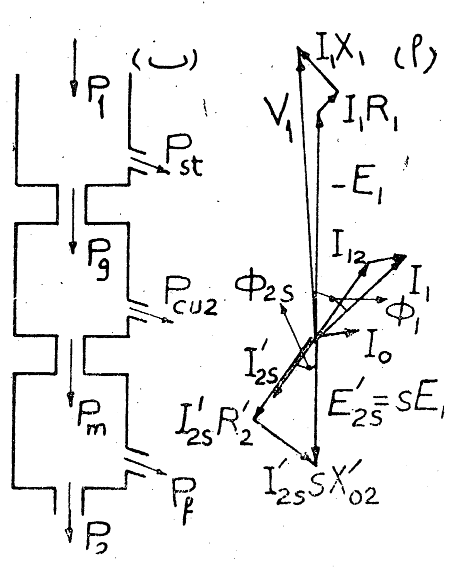
وتكون X_{20} هى ممانعة التسرب المرحلية للفات العضو الدائر ، وهو فى حالة السكون، وترتبط بالممانعة المناظرة، المنسوبة للملف الابتدائى X'_{20} ، بنفس العلاقة التى حصلنا عليها فى حالة المحول كما جاء فى المعادلة (٧ ـ ١) لأن $n = o$. كذلك الحال بالنسبة المقاومة المرحلية لملفات العضو الدائر ، التى لادخل لها بالسرعه . ونظرا لان قيمة السرعة للعضو الدائر تؤثر على التردد فيه ، فان قيمة ممانعة التسرب له تتأثر بنفس الطريقة . لذلك نجـد أن ممانعة التسرب المرحليه لملفات العضو الدائر X_{2s} عند أى انزلاق s ترتبط بممانعه التسرب المرحلية X_{20} لنفس الملفات فى حالة السكون بالعـــلاقه $X_{2s} = sX_{20}$ ، ومن ثم فان $X'_{2s} = sX'_{20}$.

نظرا لأن ملفـــات العضو الدائر تكون مقصورة نجـد بالرجوع إلى شكل (٢ ـ ١) أنه عند أى معامل انزلاق s يكـون :

$$I'_{2s} = \frac{E'_{2s}}{Z'_{2s}} = \frac{sE_1}{\sqrt{R_2'^2 + (sX'_{20})^2}} \qquad (١-٨)$$

$$\Phi_{2s} \; (I'_{2s}, E'_{2s} \text{ بين}) = \tan^{-1} \frac{s X'_{20}}{R'_2} = \tan^{-1} \frac{s X_{20}}{R_2} \qquad (١-٩)$$

وبالنسبة لملفات العضو الثابت نجد أن $\dot{E}_1$ ـ هى مركبة ضغط الينبوع $\dot{V}_1$ اللازمة لمعادلة متجه القوة الدافعة الكهربية $\dot{E}_1$ ، وأن $\dot{I}_1 R_1$ ، $\dot{I}_1 X_1$ ، كما هو مبين في شكل (٣ ـ ١) ا (مخطط متجهات المحرك وهو محمل) هما مركبتا ضغط الينبوع $\dot{V}_1$ اللازمتان لمعادلة هبوط الضغط في المقاومة المرحلية وممانعة التسرب المرحلية لملفات العضو الثابت . وبذلك يكون شكل (٣ ـ ١) ا للمحرك مناظر الشكل (٨ ـ ٧) صفحة ٣٤٣ للمحول (كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية) .



(شكل ٣ ـ ١)

(٤ ـ ١) علاقات القدرة فى المحرك المحمل : (Power relations for the loaded motor)

يأخذ المحرك من الينبوع ثلاثي المراحل القدرة الكلية P_1 وات ، وهي تساوي $3V_1I_1\cos\Phi_1$ ، حيث V_1 هو الضغط المرحلي للينبوع ، و I_1 التيار المرحلي في ملفات العضو الثابت عند الحمل الكامل ، و Φ_1 زاوية الاختلاف المرحلي بينهما ، كما هو مبين في شكل (٣ ـ ١) ا .

تبدد ملفات العضو الثابت مفقوداتها النحاسية P_{cu_1} التي تساوي $3I_1^2R_1$ وات ، كما تتبدد في نفس الوقت أيضا مفقودات الحديد الكلية تقريبا للمحرك P_{Fe} ، وذلك لأن مفقودات حديد العضو الدائر تكون ضئيلة جدا بسبب انخفاض قيمة التردد فيه عندما يكون الانزلاق صغيرا جدا عند الحمل الكامل ، كما سبقت الاشارة إليه . وبجمع P_{cu_1} مع P_{Fe} نحصل على مايسمى بمفقودات العضو الثابت (stator losses)، ويرمز لها بالرمز P_{st} . عند طرح P_{st} من P_1 نحصل على قيمة القدرة التي تنتقل إلى المجال المغناطيسي الدائر ، ويرمزلها بالرمز P_g أو P_{12} . هذه القدرة التي تتركز في المجال المغناطيسي الدائر تنقسم بعد ذلك إلى قسمين : القدرة الميكانيكية P_m ، التي ينقلها عمود الادارة إلى الحمل الميكانيكي ، بعد أن تتبدد منها المفقودات الميكانيكية P_f في اثناء ذلك ، والقدرة التي تأخذها الدائرة الكهربية المتمثلة في ملفات العضو الدائر ، وهي التي تبددها هذه الملفات على شكل مفقودات نحاسية لها ، ويرمزلها على هذا الاساس بالرمز P_{cu_2} . ويمكن تلخيص هذا كله في العلاقات الآتية للقدرة في المحرك :

$$P_g = P_{12} = P_1 - (P_{cu_1} + P_{fe}) = P_1 - P_{st}$$

$$P_g = P_{12} = P_m + P_{cu_2} \quad , \quad P_m = P_2 + P_f \qquad (١ـ١٠)$$

P_2 (قدرة المخرج للمحرك) ، $BHP = \frac{P_2}{746}$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad , \quad P_1 = 3V_1 I_1 \cos\Phi_1 \qquad (١ـ١١)$$

$$P_{cu_2} = 3 I'^2_{2s} R'_2 = 3 I_{2s} R_2 \;,\; P_{cu_1} = 3 I_1^2 R_1 \quad (١-١٢)$$

نجد فى شكل (٣ ـ ١)ب شكلا تخطيطيا يبين كيف تنتقص المفقودات بالتدريج من قدرة الدخل P_I . وبالرجوع إلي مخطـــط المتجهات فى شكل (٣ ـ ١) ا نجد أن :

$$P_{12} = P_g = 3 E_1 I_{12} \cos \phi_{2s}$$

$$E_1 = E'_{20} = \frac{E'_{2s}}{S} = \frac{I'_{2s} Z'_{2s}}{S}$$

$$I_{12} = I'_{2s} \quad , \quad \cos \phi_{2s} = \frac{R'_2}{Z'_{2s}}$$

$$\because P_{12} = P_g = 3 \frac{I'^2_{2s} R'_2}{s} = \frac{P_{cu_2}}{s} \qquad (١ - ١٣)$$

$$\therefore P_m + P_{cu_2} = \frac{P_{cu_2}}{s} \quad , \quad P_m = \frac{P_{cu_2}}{s} (1 - s)$$

$$\therefore P_m = P_g (1 - s) \quad , \quad P_{cu_2} = sP_g \qquad (١ - ١٤)$$

$$\therefore P_g : P_m : P_{cu_2} = 1 : (1 - s) ; s \qquad (١ - ١٥)$$

نستنتج من المعادلة (١٥ ـ ١) أن القدرة المتركزة فيالمجال المغناطيسى P_{12} وهى التى يطلقعليها عادة اسـم قدرة الثغرة الهوائية (air gap power)، ويرمزلها على هذا الأساس بالرمز P_g تنقسم بين القـدرة الميكانيكية الكلية (total mechanical power) P_m ، وبين المفقودات النحاسية لملفات العضو الدائر P_{cu_2} بنسبة ($1 - s$) إلى s . وهذا يعنى مراعاة أن يطلق على P_2 ، لتميزها عن P_m ، اسم القدرة الميكانيكية المفيدة (useful mechanical power).
تكون طبيعة تكوين المحرك بحيث يتم تشغيلة عند أقل قيمة ممكنة للانزلاق

s عند الحمل الكامل، لكي نحصل على معامل جودة مرتفع . وهـذا ماهو حادث فعلا بالنسبة لقيم s عند الحمل الكامل في المحركات المتداولة ، كما أشرنا إليها من قبل .

(٥ - ١) عزم الدوران : (The torque)

يتولد عزم الدوران الكلي T (total torque) بوساطة المجـــال المغناطيسي الدائر بالسرعة المتزامنه n_s بسبب تركز القدرة P_g فيه . وعلى هذا الأساس يجب أن يكون $T = \frac{P_g}{2\pi \frac{n_s}{60}}$ جول . وينشأ نفس عزم الدوران الكلي T على عمود الادارة الذي يدور بالسرعة n بفعل القـــدرة الميكانيكيه P_m ، حيث يجب أن يكون $T = \frac{P_m}{2\pi \frac{n}{60}}$ جول . ويمكننا على العموم ايجـــاد T بدلالة الانزلاق s باستخدام احدى هاتين العلاقتين ، والتعويض عن P_g من العلاقات السابقة ، وذلك على النحو التالي :

$$T = \frac{P_m}{2\pi \frac{n}{60}} = \frac{P_g (1-s)}{2\pi \frac{n_s(1-s)}{60}} = \frac{P_g}{2\pi \frac{n_s}{60}} \quad \text{جول}$$

$$= \frac{P_g}{2\pi \frac{n_s}{60} \times 9.81} \quad \text{kg.m.} \quad (\text{كجم . متر}) \qquad (١٦ - ١)$$

يتكون عزم الدوران الكلي T من عزم الدوران المفيد (useful torque) T_u وعزم دوران المفقودات الميكانيكية T_f . ونستفيد بعزم الدوران المفيد بأكمله في الحمل الميكانيكي ، بينما يذهب P_f هباء في المفقودات . ويمكن الحصول على عزم الدوران المفيد من قدرة المخرج P_2 ، أو القدرة الفرملية BHP حيث نجد أن :

$$T_u = \frac{P_2}{2\pi \frac{n}{60} \times 9.81} = \frac{BHP \times 746}{2\pi \frac{n}{60} \times 9.81} \quad kg.m.$$

كذلك يمكن حساب T_f من المفقودات الميكانيكية P_f ، ثم حساب T_u :

$$T_f = \frac{P_f}{2\pi \frac{n}{60} \times 9.81} \; kg.m.$$

$$T_u = T - T_f$$

هذا ، ولكى نحصل على العلاقة بين عزم الدوران الكلى والانزلاق s نعوض بالعلاقات الآتيه فى المعادلة (١٦ – ١)

$$P_g = 3E_1 I_{12} \cos\phi_{2s} \quad , \quad I'_{2s} = I_{12} = \frac{E'_{2s}}{Z'_{2s}}$$

$$E'_{2s} = sE'_{20} = sE_1 \quad , \quad \cos\phi_{2s} = \frac{R'_2}{Z'_{2s}}$$

$$\therefore \; T = \frac{3E_1^2}{2\pi \frac{n_s}{60} \times 9.81} \cdot \frac{sR'_2}{R'^2_2 + s^2 X'^2_{20}}$$

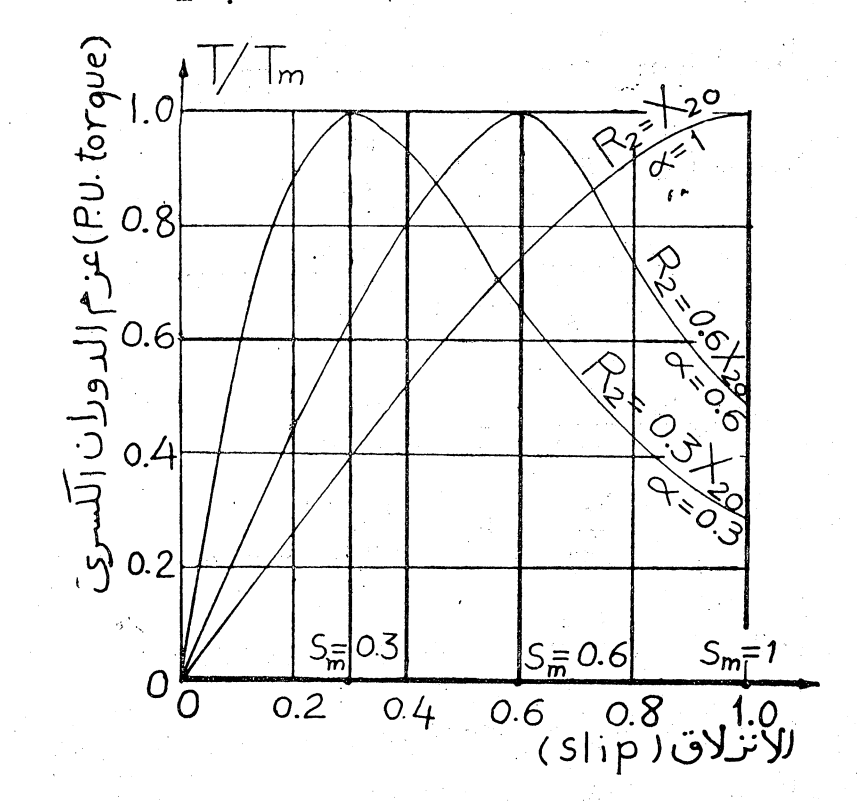
$$= \frac{2pE_1}{2T_1 f_1 \times 9.81 X'_{20}} \cdot \frac{s\infty}{s^2 + \infty^2}$$

$$\infty = \frac{R'_2}{X'_{20}} = \frac{R_2}{X_{20}} \quad , \quad K_t = \frac{3pE_1^2}{2\pi f_1 \times 9.81 X'_{20}} \quad kg.m$$

$$\therefore \; T = K_t \frac{S\infty}{S^2 + \infty^2} \quad Kg.m. \qquad (١ – ١٧)$$

تعطى المعادلة (١٧ –) عزم الدوران الكلى للمحرك كدالة للانزلاق المتغير S عند قيمة معينةللثابت الاختيـارى ∝ . وكلما تغيرت قيمة الثابت

الاختيارى (parameter) نحصل على منحنى مختلف للدالة T بتغيير s ؛ ونظرا لاننـا نعتبر K_t في معادلة عزم الدوران ثابتا مطلقا لايتغير ، بينما تتوقف قيمة K_t على X'_{20} ، فان تغير الثابت الاختــــيارى $\propto = \frac{R'_2}{X'_{20}}$ يجب أن يأتى عن طريق تغيير R'_2 ، مع عدم المساس بقيمة X'_{20} (أو X_{20}) والتى تظل ثابتة على الدوام . وهذا يعنى أن تظل ممـانعة التسرب المرحلية للفات العضو الدائر ثابتة بينما تأخذ قيما مختلفة لمقاومة هذه الملفات المرحلية للحصول على مجمـــوعة من منحنيات عزم الدوران الكلى T مع الانزلاق s بقيمـة مختلفـة للثـابت الاختيـــاري $\propto$ على كل منحنى . يبين شـكل (٤ — ١) مثل هذه المنحنيات باعتبار عزم الدوران النسبي $\frac{T}{T_m}$.



(شكل ٤ — ١)

يتضح من شكل (٤ — ١) أن عزم الدوران الكلى يصل إلى قيمة النهاية العظمى T_m عند قيمة معينه للانزلاق S_m . هذا ، ويمكن ايجاد قيمة كل من T_m و S_m بايجاد التفاضل $\frac{dT}{ds}$ من المعادلة (١٧ – ١) ، ومساواته بالصفر ، على النحو التالي :

$$\frac{dT}{dS} = o = K_t \frac{(S^2m + \propto^2)\propto - S_m \times 2S_m}{(S^2m + \propto^2)^2}$$

وحيث أن $\propto$ لايمكن أن تساوى صفرا :

$$\therefore S^2m + \propto - 2S^2m = O \quad , \therefore S^2m = \propto^2 \; , \; S_m = \pm \propto \quad (١ - ١٨)$$

تخص الاشارة الموجبة في المعادلة (١٨ – ١) حالة المحرك التى تهمنا فى الوقت الراهن ، أما الاشارة السالبة فهى خاصة بحالة المولد . وهذا يعنى أن عزم دوران المحرك يصل إلى قيمة النهاية العظمى له عند قيمة للانزلاق S_m تساوى الثابت الاختيارى $\propto$. ولما كانت قيمة هذا الثابت تتحدد بتحديد قيمة معينه لمقاومه ملفات العضو الدائر المرحليه R_2 ، كما سبقت الاشاره اليه ، فاننا نستطيع تغيير موضع النهايه العظمى لعزم الدوران T_m عند الانزلاق S_m ، عن طريقه تغييرقيمة R_2 (أو R'_2) . وتظل القيمه T_m ثابته فى هذه الحالة نظرا لثبوت قيمه K_t (X'_{20} ثابتة القيمه) . بوضع $S = S_m = \propto$ فى المعادلة (١٧ – ١) نحصل على قيمه T_m ، حيث :

$$T_m = K_t \frac{S_m \propto}{S^2m + \propto^2} = K_t \frac{\propto^2}{\propto^2 + \propto^2} = \tfrac{1}{2} K_t \quad (١ - ١٩)$$

$$\because T = 2\,T_m \frac{S \propto}{s^2 + \propto^2} \; , \; \frac{T}{T_m} = \frac{2s \propto}{s^2 + \propto^2} \qquad (١ - ٢٠)$$

$$\frac{T}{T_m}\ \% = \frac{002\,s \propto}{s^2 + \propto^2} \qquad (\text{١ — ٢١})$$

تعطي المعادلة (٢٠ — ١) عزم الدوران منسوبا إلى قيمة النهاية العظمى له ، كما تعطى المعادلة (٢١ — ١) النسبة المئوية لهذا العزم ، وقد استخدمت المعادلة (٢٠ — ١) لرسم منحنيات عزم الدوران المبينة فى شكل (٤—١) ، حيث نجد أنه عندما يكون عزم الدوران الكلى في قيمة النهاية العظمي له T_m تكون قيمة النهاية العظمى للنسبة $\frac{T}{T_m}$ تساوى الوحدة ، وتكون القيمة المناظرة لعزم الدوران المئوى 100 .

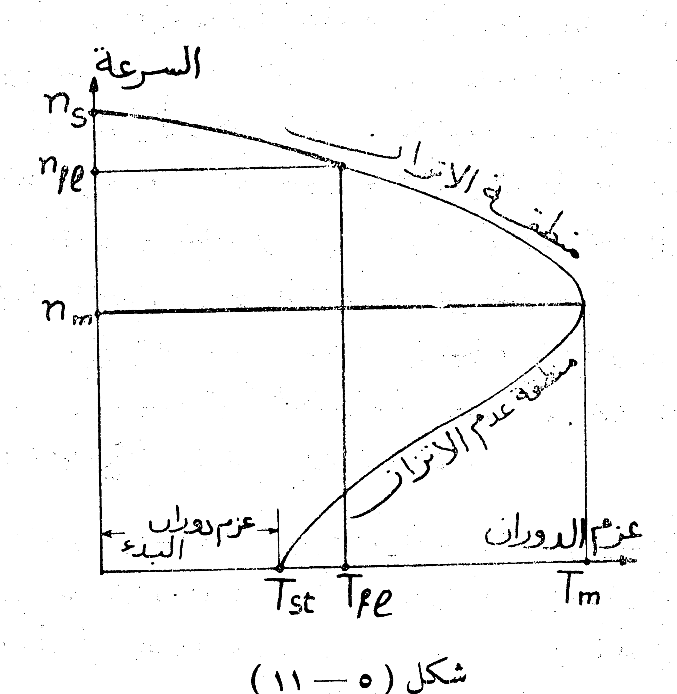
يؤدى تغيير R_2 (أو R'_2) إلى تغيـــير موضع النهاية العظمى لعزم الدوران عند ثبوت قيمة X_{20} (أو X'_{20}) كما ذكرنا ، بينما لاتتأثر قيمة النهاية العظمى لعزم الدوران فى هذه الحالة كما تعطيها المعادلة (١٩ – ١).وقد نحتاج ، فى بعض الأحيان ، أن نحصـل من المحرك على عزم دوران بدء T_{st} يكون كبيرا ، مما يجعلنا نعمل على ترتيب الأمور بحيث يعطى المحرك قيمة النهاية العظمى لعزم دورانه عند البدء . وهذا يعنى أن كلا من S_m و $\propto$ يجب أن يصبح مساويا للواحد الصحيح، مما يعنى العمل على تغير قيمة R_2 حتى يتحقق هذا الشرط ، إن كانت قيمتها لاتحققه فعلا . فاذا فرضنا أننـــا نحتاج إلى إضافة مقاومة قيمتها R_{st} إلى R_2 فى كل مرحلة من مراحل العضو الدائر ، بتوصيلها إلى الفرش على الحلقات الانزلاقية ، نجد أن :

$$\frac{R_2 + R_{st}}{X_{20}} = \propto = 1 \quad , \quad R_{st} = X_{20} - R_2 \qquad (\text{١ – ٢٢})$$

نخرج من دراسة منحنى عزم دوران المحرك ، كما جاء فى شكل (٤ - ١) بالنتائج الهامة التي يمكن تخليصها فيما يأتى :

اولا : ينقسم المنحنى إلى جزءين مختلفين ، بالنسبة لعلاقة عزم الدوران

بالانزلاق، فمن $S = 0$ إلي $S = S_m$ يزداد عزم الدوران بزيادة قيمة الانزلاق بينما يقل عزم الدوران الذى يبذله المحرك من $S = S_m$ إلى $S = 1$. ويقال إن المحرك يمتلك خواص تشغيل متزنة (stable operation) فى الجــــزء الأول، بينما تكون خواص تشغيله غير متزنة(ustable operation) فى الجزء الثانى ، كما هو مبين فى شكل (٥ - ١) ، الذى تغير فيه موضع المحاور عن شكل ٤ - ١ ، وحلت السرعة محل الانزلاق على المحور الرأسى . والنتيجة



شكل (٥ — ١١)

الحتمية لوجود منطقتين منفصلتين فى خواص تشغيل المحرك ، تتوفر فى احداهما خاصيه الاتزان وتنعدم فى الأخرى ،أن نحرص علي أن يظل تشغيل المحرك محصورا فى منطقة الاتزان ، فلا ينتقل منها إلى المنطقه الأخرى إلا تحت ظروف خارجة عن ارادتنا . ولكن نضع هذا الكلام فى صورة أكثر وضوحا نقول : إن أيه زيادة فى عزم دوران الحمل تؤدى إلى خفض سرعه المحرك بطريقه آلية ، وتؤدى بالتالى إلى زيادة قيمه الإنزلاق . فاذا كان

المحرك عاملا فى منطقة الاتزان بين $S = 0$ و $S = S_m$ (أى بين السرعة $n = n_s$ والسرعة $n = n_m$) ، ولم يكن انخفاض سرعته بالدرجة التى تجعله يتعداها ، فان تجاوبه مع انخفاض السرعة يكون بزيادة عزم دورانه ، بحيث يقابل الزيادة في عزم دوران الحمل . لذلك تستقر الأمور فى النهاية على وضع الاتزان بين عزم دوران الحمل الجديد وعزم دوران المحرك الذى أصبح يساويه عند الانزلاق الجديد .

أما إذا كان المحرك عاملا فى منطقة عدم الاتزان ، بين $S = S_m$ و $S = 1$ (أى بين السرعة $n = n_m$ والسرعة $n = 0$) وزاد الحمل عليه ، أو كان عاملا فى منطقة الاتزان وكان انخفاض سرعته نتيجة الحمل عليه بحيث ينتقل إلى منطقة عدم الاتزان ، فانه يتجاوب مع انخفاض السرعة بتقليل قيمة عزم الدوران الذى يبذله لمقابلة عزم دوران الحمل المتزايد ، مما يؤدى إلى ظهور عزم دوران تقصيرى علي عمود الادارة يعمل على خفض سرعة المحرك مرة أخرى . وتتوالى عملية خفض سرعة المحرك نتيجة لانخفاض قيمة عزم الدوران الذى يبذله نتيجة لخفض السرعة ، حتي يصل المحرك إلى حالة السكون ، فيصبح فى حالة قصر ، وقد تسوء الأمور .

ولكى نضمن عدم انتقال المحرك من منطقة التشغيل المتزن إلي منطقة التشغيل غير المتزن نتيجة لأية زيادة مقبولة في عزم دوران الحمل (حوالى 20 % إلى 25 %) ، أو أيه زيادة طارئة لا يستمر وجودها لانها تؤدى إلى فصل المحرك عن الينبوع (حوالى 50 %) ، يجب ألا تقل قيمة النهاية العظمي لعزم دوران المحرك عن ضعف عزم دوران الحمل الكامل تقريبا . بذلك يصبح حد الحمل الكامل للمحرك المبين بخط ثقيل على منحنى عزم الدوران فى شكل (٥ـ ١) بعيدا بما فيه الكفاية عن حد منطقة عدم الاتزان .

ومن الواضح نتيجة لهذا الكلام كله أنه يجب أن تتوفر للمحرك ظروف البدء التى تجعله يمر بسلام من خلال منطقة عدم الاتزان ، التي يتحتم عليه أن

يمر بها أثناء فترة البـــدء ، حتى يصبح عاملا فى منطقة الاتزان . وهذا يستدعى أن يكون عزم دوران البدء أكبر من عزم دوران الحمل المضاد على عمود الادارة بما يكفى لتعجيل العضو الدائر، بكل مايمتلكه من قصور ذاتى . (Inertia)

فمن الواضح ، مثلا ، ان المحرك المبين منحنى عزم دورانه فى شـــكل (٥ ـ ١) لايمكن أن يقوم (starts) وعليه الحمل الـكامل ، إذ أن عزم دوران البدء أصغر من عزم دوران الحمل الكامل .

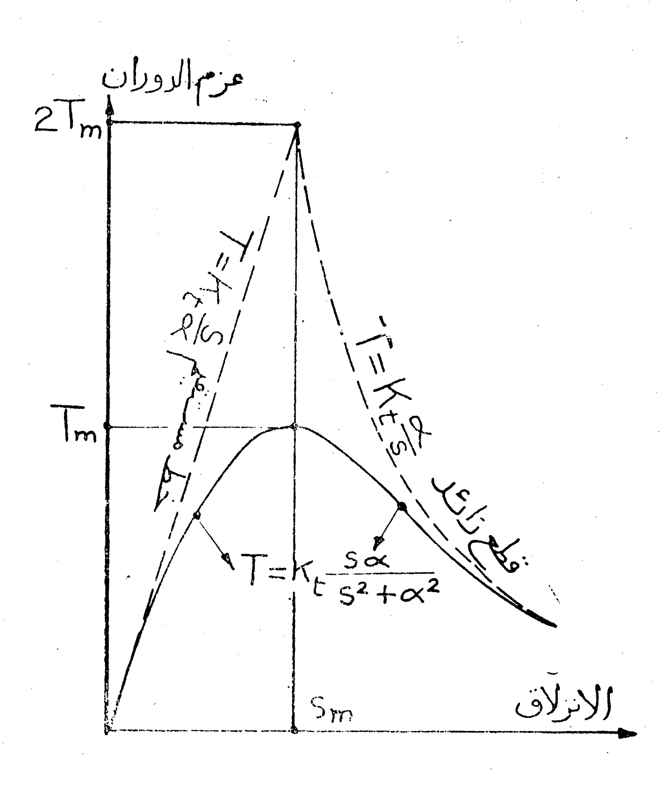
ثانيـا : نحتاج في حل بعض المسائل الخاصة بتنظيم سرعة المحرك إلى علاقة بين عزم الدوران والانزلاق ، تكون أسهل تركيبا من العلاقة المعطاة بالمعادلة (١٧ ـ ١) . لذلك نقســم المنحنى إلى جزءين ، كما جاء فى أولا ، ويكون تبسيط المعادلة لكل من الجزءين على النحو التالى :

١ ـ من $S = O$ إلى $S = S_m$ نجد أن منحنى عزم الدوران أقرب ما يكون فى شكله إلى الخط المستقيم ، ولو راعينا أن قيمة S فى حدود الحمل الكامل تكون صغيرة بالنسبة لقيمة $\propto$ (على أساس أن S عند الحمل الكامل تكون حوالى نصف $\propto$ أو أقل قليلا على حسب ماسبق شرحه في أولا) ، نستطيع أن نهمل S^2 بالنسبة لـ$\propto^2$ فى المعادلة (١٧ ـ ١) ، مما يؤدى بنا إلى الحصول على معادلة مستقيم فى هذه المنطقة فعلا ، وذلك على النحو التالى :

$$T = K_t \frac{S\propto}{S^2 + \propto^2} \overset{\backsim}{=} K_t \frac{S}{\propto} \overset{\backsim}{=} \frac{K_t}{\propto} S \quad (١ - ٢٣)$$

٢ ـ من $S = S_m$ إلى $S = 1$ نجد أن منحنى عزم الدوران أقرب مايكون فى شكله إلي القطع الزائد (hyperbola) . وفى الواقع أننا لوراعينا أن S تكون اكبر من $\propto$ فى هذه المنطقة ، بما يسمح لنا باهمال $\propto^2$ بالنسبة لـS^2 فى المعادلة (١٧ ـ ١) ، فاننـا نحصل بذلك فعـلا على معـادلة تقريبية لعزم الدوران مع الانزلاق تمثل قطعا زائدا ، كما يأتى :

$$T = K_t \frac{S\alpha}{S^2 + \alpha^2} \cong K_t \frac{\alpha}{S} \qquad (١ - ٢٤)$$



(شكل ٦ – ١)

يبين شكل (٦ – ١) المنحنيين الذين تمثلهما المعـادلتان (٢٣ – ١) و (٢٤ – ١) مع المنحنى الأصلى ، الذى تمثله المعادلة (١٧ – ١) . ومن الواضح ، سواء بمراجعة شكل (٦ – ١) أو مراجعة الفرضين اللذين أديا إلى الحصول على المنحنيين الجديدين ، أن المعادلة (٢٣ – ١) تكون أكثر دقة كلما اقتربت قيمة S من الصفر ، كما أن المعـادلة (٢٤ – ١) تكون أكثر دقة ايضا كلما اقتربت قيمة S من الواحد الصحيح . هذا ، وتعطى المعادلتان نتائج بعيدة عن الصحـة ، بطبيعة الحال ، إذا كانت قيمة S قريبة

من S_m ، حيث نجد أن كلامنهما تعطى قيمة لـ T_m تساوى K_t عند ماتكون $S = S_m$.

(٦ ـ ١) الدائرة المكافئة ومخطط الدائرة :

(The equivalent circuit and the circle diagram)

ذكرنا أننا سوف نستنبط الدائرة المكافئة للمحرك على مرحلتين ، المرحلة الأولى منهما هى تلك التى حصلنا فيها على الدائرة المكافئة المبينة فى شكل (٢ ـ ١) ، واستخدمناها فى الحصول على علاقات القدرة وعزم الدوران . ونظرا لعدم تساوى الضغط على الملفين الابتدائى والثانوى فى فى هذه الدائرة ، فقد احتفظنا بها منفصلين مع الاكتفاء بنسبة حدود الملف الثانوى إلى الملف الابتدائى فى هذه المرحلة .

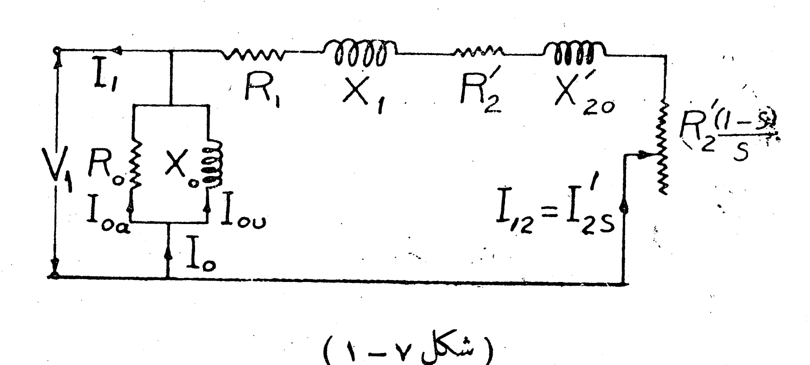
ونظرا لاختلاف الضغط من E_1 على الملف الابتدائى إلى SE_1 على الملف الثانوى ، أى بنسبة $S : 1$ فى هذه الحالة ، مع تساوى التيارين وزاويتى اختلافهما المرحلى فى الملفين ($I_{12} = I'_{2s}$) ، نجد أن هناك اختلافا فى القدرة للملفين بنفس النسبة أيضا . وهذا ينشأ بسبب دوران الملفات الثانوية على العضو الدائر بالسرعة n مما ينتج عنه أن القدرة الميكانيكية الكلية P_m تنتقل على أساس هذه الدائرة المكافئة إلى عمود الادارة من المجال المغناطيسي الدائر مباشرة ، دون أن يظهر لها أى أثر فى الملف الثانوى ، الذى يمثل الدائرة الكهربية للعضو الدائر .

ولكى تكتمل الصورة فى الدائرة المكافئة المحرك يجب أن تظهر فيها هذه القدرة الميكانيكية على أى شكل . ولا يتأتى ذلك إلا بالحصول على المرحلة الثانية للدائرة المكافئة ، التى يكون فيها الضغط على طرفى الملف الابتدائى مساويا للضغط على طرفى الملف الثانوى ، بحيث يمكن حذفهما

وعمل دائرة واحدة متصلة على النحو الآتى : بقسمة البسط والمقام فى المعادلة (٨ ـ ١) على S نجد أن :

$$I'_{2s} = I_{12} = \frac{E_1}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{S}\right)^2 + X'^2_{20}}} \qquad (١ - ٢٥)$$

وهذا يعنى أننا نحصل على نفس الخواص الكهربية للملف الثانوى فى الدائرة المكافئة فى شكل (٢ ـ ١) ، مع وجود الضغط E_1 على طرفيه بدلا من الضغط sE_1 ، إذا استبدلنا الممانعة SX'_{20} بالممانعة X'_{20} ، والمقاومة R'_2 بالمقاومة R'_2/s . وفى هذه الحالة يمكن وصل طرفى الملف الابتدائى مع طرفى الملف الثانوى ، والاستغناء عن الملفين للحصول على دائرة مكافئة متصلة ، كما سبق أن فعلنا فى حالة المحول . وهذه هى المرحلة الثانية ، والأخيرة ، للدائرة المكافئة المطلوبة ، المبينة فى شكل (٧ ـ ١) .



(شكل ٧ ـ ١)

يلاحظ أننا استبدلنا المقاومة R'_2/s بحدى المقاومة المساويين لها ، $R'_2(1-S)/s$ مضافا إليها R'_2 ، حيث أن

$$R'_2 + R'_2\frac{(1-S)}{S} = R'_2 + \frac{R'_2}{S} - R'_2 = \frac{R'_2}{S}$$

ونظرا لأن التيار المار فى المقاومة $R'_2(1-S)/s$ هو $I_{12} = I'_{2s}$ ،
فان القدرة التى تستهلكها هذه المقاومة هى :

$$\text{القدرة الميكانيكية} = P_m = I'^2_{2s} R'_2 \frac{(1-S)}{S}$$

وهذا يعنى أن الدائرة المكافئة الجديدة قد اصبحت تشتمل على الحد الذى يعطي القدرة الميكانيكية للمحرك ، مع تغيرها بتغيير الانزلاق S . وهذا الحد هو عبارة عن المقاومة المتغيرة $R'_2(1-s)/s$ ، التى تتغير قيمتها بتغيير قيمة الانزلاق S . يمكن باستخدام الدائرة المكافئة الجديدة الحصول على قيمة التيار $I_{12} = I'_{2s}$ بدلالة ضغط الينبوع المرحلى V_1 ، وثوابت المحرك R_1, X_1, R'_2, X'_{20} ، كدالة للانزلاق S ، كما يأتى :

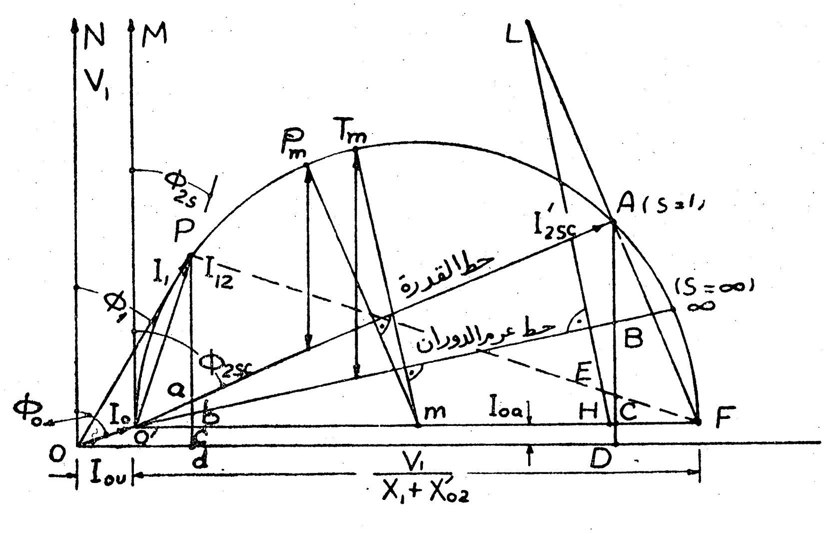
$$I_{12} = I'_{2s} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right)^2 + (X_1 + X'_{20})^2}} \quad (١ — ٢٦)$$

وتكون زواية الاختلاف المرحلى ϕ_{12} لهذا التيار مع الضغط V_1 عبارة

$$\phi_{12} = \phi_{2s} = \tan^{-1}(X_1 + X'_{20}) \Big/ \left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right) \quad (١ - ٢٧)$$

ويمثل المحرك ، فى هذه الحالة ، دائرة كهربية بسيطة ، مكونة من ممانعة ثابتة $(X_1 + X'_{20})$ ، ومقاومة متغيرة $\left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right)$ ، موصلة على ينبوع تيار متردد ذى ضغط ثابت القيمة V_1 . ويكون تمثيل التيار بالاحداثيات القطبية (polar coordinates) ، فى هذه الحالة ، بطولة I'_{2s} وزاوية اختلاف المرحلى ϕ_{2s} مع المحور الاساسى الذى ينطبق عليه V_1 ، كما يكون المتغير الأصلي هو الانزلاق S .

من المعروف في علم الدوائر الكهربية (Electric circuits) أن المحل الهندسي الذى يرسمه طرف التيار فى هذه الحالة ، عندما تتغير قيمة S ، يكون عبارة عن نصف دائرة نحاول فيما يأتى ايجاد ابسط الوسائل لرسمها . فاذا اعتبرنا أن O′ ، فى شكل (٨ – ١) هى نقطة الأصل للتيار



(شكل ٨ – ١)

$I_{12} = I_{2s}$ ، وأن اتجاه الضغط V_1 مع اتجاه المحور الاساسى هو O′M ، نجد أنه عندما تصبح قيمة المقاومة المتغيرة $R_1 + \frac{R'_2}{S}$ صفرا (وهو افتراض نظرى بحت فى حالة المحرك لكى يمكن رسم الدائرة) ، فان التيار يكون متأخرا بزاوية مرحلية مقدارها 90° ، و تكون قيمته $V_1/(X_1 + X'_{20})$ وهذه هى احدى قيمتى الحدود (boundary value) للتيار التى تمثل أقصى قيمة ممكنة للتيار ، وتحدد بذلك طول قطر نصف الدائرة المطلوبة .

فاذا اتخذنا مقياس رسم للتيار ، بحيث يمثل كل سنتيمتر واحد تيارا مقداره X أمبير ، نستطيع رسم قطر الدائرة O′F ، الذى يساوى $V_1/\chi(X_1 + X'_{20})$ سنتيمترات ، فى هذه الحالة .

ومن الواضح أنه عندما تساوى قيمة S مالانهاية ($S = \infty$) ، فان قيمة المقاومة تصبح R_1 فقط ، وبذلك نستطيع أن نحصل على قيمة التيار I'_{2s} عندما تكون $S = \infty$ ، ومن ثم النقطة ∞ الموافقة لهذا الشرط على الدائرة ، حيث يكون :

$$I'_{2s}(\infty) = \frac{V_1}{\sqrt{R_1{}^2 + (X_1 + X'_{20})^2}} \text{ A}, \quad O'\infty = \frac{I'_{2s}(\infty)}{\chi} \text{ cms}$$

(٢٨ - ١)

كذلك نجد أنه عندما تساوى S صفرا ، فان قيمة المقاومة تصبح مالانهاية ، مما يجعل قيمة التيار I'_{2s} صفرا . وهذا يعنى أن النقطة O' تمثل الوضع عندما تكون S تساوى صفرا .

يمكننا بعد ذلك تعيين أية نقطة على الدائرة تناظر أية قيمة للانزلاق S باحدى طريقتين :

١ ـ أن نحدد قيمة التيار المناظر I'_{2s} باستخدام المعادلة (٢٦ ـ ١) ، (وذلك باعتبار أن ثوابت المحرك R_1, R_2', X_1, X'_{20} معروفة) ، التي تحدد طول الوتر المناظر ، على حسب مقياس الرسم .

٢ ـ أن نحسب قيمة زاوية الاختلاف المرحلى ϕ_{2s} ، بين I'_{2s} , V_1 ، وهى التى تحدد الزاوية التى يصنعها الوتر مع المحور الاساسي OM ، فيمكن بذلك تعيين النقطة المطلوبة .

من أهم التقريبات الموجودة فى الدائرة المكافئة فى شكل (٧ ـ ١) ثبوت قيمة تيار اللاحمل للمحرك ، وثبوت قيمة المفقودات الحديدية والميكانيكية ، وتيار المغطسة ، وكذلك الفيض المغناطيسي المتبادل ϕ_m . وهذه فى الواقع تقريبات لازمة إلى جانب افتراض أن ثوابت المحرك

لاتتعرض لأية تغييرات،وذلك للحصول على نظريات وقواعدسهلة الاستنباط لخواص المحرك ، تعطى نتائج ذات تقريب مقبول بالنسبة للنتائج التى نحصل عليها من المحرك عمليا . وهذا يستوجب الافتراض ضمنا بأن سرعة المحرك عند اللاحمل تساوى السرعة المتزامنة ، أو بمعنى آخر أن المحرك يأخذ تيار اللاحمل I_0 من الينبوع فى الوقت الذى تكون فيه قيمة الانزلاق s تساوى صفرا ، وبالتالى تكون قيمة التيار $I_{12} = I'_{2s}$ تساوى صفرا .

وهذا يدعونا إلى اعتبارا النقطة 'O تمثل الوضع ، بالنسبة لقيمة التيار الذى يأخذه المحرك من الينبوع ، فى حالة اللاحمل (no load point) .

فاذا رسمنا 'OO ممثلا لتيار اللاحمل I_0 ، بزاوية اختلافه المرحلى ϕ_0 مع الضغط V_1 الذى ينطبق على المحور الأساسى الجديد ON، نستطيع الحصول على قيمة تيار الينبوع المرحلى I_1 ، عند أية قيمة للانزلاق ، بالقياس من O بدلا من 'O حتى النقطة المناظرة على الدائرة . وتتحدد زاوية الاختلاف المرحلي ϕ_1 بين I_1 واتجاه V_1 أو المحور الأساسي ON .

يهمنا بعد ذلك الحصول علي نقطة القصر (short circuit point) للمحرك . ونظر لأن ملفات العضو الدائر تكون مقصورة دائما ، فان مفهوم دائرة القصر (short circuit conception) ينصب هنا على الحالة التى يأخذفيها المحرك تيارا يكون ذا قيمة غير عادية بالنسبة لتيار الحمل الكامل ويمثل استمرار وجوده خطرا عليه . وهذه هى الحالة التي يكون فيها العضو الدائر ساكنا ، (standstill) أى عندما تكون قيمة الانزلاق تساوى الوحدة .

معنى هذا أننا نعتبر المحرك فى حالة قصر عندما يظل العضو الدائر ساكنا ،

وتكون $s = 1$. ويمكن الوصول إلى نفس هذه النتيجة ، بالرجوع إلى الدائرة المكافئة للمحرك شكل (٧ - ١) ، حيث نجد أنه عندما تكون $s=1$ فان حد المقاومة $R'_2 (1 - s) / s$ ، الذى يمثل الحمل الميكانيكي على المحرك ويمثل لذلك الحمل فى الدائرة الكهربية ، يصبح مساويا للصفر ، بمعنى نشوء دائرة قصر فى هذه الحالة .

من الواضح ، إذا ، أننا نستطيع الحصول على نقطة القصر A ($s=1$)، على الدائرة ، عن طريق تحديد قيمة تيار القصر I'_{2sc} ، أو زاوية اختلافه المرحلى Φ_{2sc} ، بالتعويض فى المعادلة (٢٦ - ١) ، أو المعادلة (٢٧ - ١) بالقيمة $s = 1$ ، حيث نجد أن :

$$I'_{2sc} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_{20})^2}}$$

$$\Phi_{2sc} = \tan^{-1} (X_1 + X'_{20}) / (R_1 + R'_2) \qquad (٢٩ - ١)$$

إذا راعينا أن المركبة الرأسية للتيار فى شكل (٨ - ١) ، الذى نطلق عليه اسم مخطط الدائرة للمحرك (circle diagram) ، تمثل المركبة الفعالة له ، وأن ضغط الينبوع المرحلى V_1 يعتبر ثابتا ، يمكننا أن ندرك أن أية مسافة رأسية على الشكل تمثل قدرة فعالة بمقياس رسم للقدرة عبارة عن أن كل سنتيمتر واحد يمثل $3 V_1 \chi$ وات ، على حسب التيار الذى تمثله هذه المسافة الرأسية .

فبالنسبة للمسافة الرأسية AC ، التى تمثل المركبة الفعالة لتيار القصر I'_{2sc} ، يجب أن يمثل الطول AC القدرة $3 I'^2_{2sc} (R_1 + R'_2)$. فاذا عينا النقطة B على AC ، بحيث يكون $(AB/BC) = (R'_2/R_1)$ ، فان AB يمثل مفقودات النحاس فى العضو الثابت $P_{cu1} = I'^2_{2sc} R_1$ ، بينما يمثل BC

مفقودات النحاس في العضو الثابت $P_{cu2} = 3I'^2_{2sc}R'_2$.

وعلى هذا الاساس يكون CD ممثلا للقدرة $I^2_{oa} R_o$ ، أى ممثلا للمفقودات الحديدية والميكانيكية للمحرك . وهذا يعنى أننا فصلنا المفقودات الحديدية عن مفقودات النحاس للعضو الثابت ، واضفناها إلي المفقودات الميكانيكية مع قدرة المخرج ، وهو تقريب لابد منه أيضاً ، إلى جانب التقريبات التي سبق ذكرها ، لتسهيل الأمور ، مع عدم المساس بدرجة الدقة المطلوبة فى النتائج .

بذلك يصبح AD ممثلا لقدرة المدخل للمحرك وهو فى حالة القصر ، حيث تكون A ممثلة لنقطة التشغيل (s=1) في هذه الحالة . ونظرا لأن قدرة المخرج P_2 تساوى صفرا فى هذه الحالة ايضا ، فان النقطة A تفى بهذا الشرط ، على أساس أن قدرة المخرج تقاس بالمسافة الرأسيه بين الخط O'A ونقطة التشغيل المناظرة على محيط الدائرة . وبناء علي ذلك يطلق على الخط O'A اسم خط القدرة (power line) . يمثل AB مفقودات النحاس فى ملفات العضو الدائر $3I'^2_{2sc} R'_2$ ، كما سبق بيانه ، عند s=1 . وهذا يعنى أنه يمثل في نفس الوقت قدرة الثغرة الهوائية P_g . ونظرا لأن عزم الدوران الكلى للمحرك ، وهو عزم دوران البدء T_{st} فى هذة الحالة ، يساوى $P_g / (2\pi \frac{n_s}{60} \times 9.81)$ كجم . متر ، نستطيع أن نعتبر أن OA يمثل عزم دوران البدء T_{st} بمقياس رسم لعزم الدوران عبارة عن كل سنتيمتر يمثل

$3 V_1 \chi / (2\pi \frac{n_s}{60} \times 9.81)$ كجم . متر .

وبناء على ذلك فان المسافة الرأسية بين الخط O'B وأية نقطة تشغيل P مناظرة لانزلاق معين s على محيط الدائرة تعطى بمقياس رسم القدرة قيمة القدرة فى الثغرة الهوائية P_g . كما أنها تعطى بمقياس رسم عزم الدوران

الذى يتحدد بناء على مقياس رسم القـــدرة والسرعة الزاوية الثابتة $\omega_s = 2\pi \frac{n_s}{60}$ ، عزم الدوران الكلى للمحرك . لذلك يطلق على الخط O′ B اسم خط عزم الدوران (torque line) . بناء على ماسبق كله نجد أنه ، بالنسبة لمقاييس الرسم على مخطط الدائرة ، وبالنسبة للمعلومات التى يمكن أن نحصل عليها من المخطط عند نقطة تشغيل معينة P ، مناظرة لانزلاق معين S ، يكون :

أولا – إذا كان كل ١ سنتيمتر يمثل χ أمبير للتيار

فان كل ١ سنتيمتر يمثل $\chi\, 3 V_1$ وات للقدرة

كما أن كل ١ سنتيمتر يمثل $\frac{3 V_1 \;\; \chi}{2\pi \frac{n_s}{60} \times 9.81}$ كجم متر لعزم الدوران

ثانيا يمثل O′a ، بمقياس رسم التيار ، $I_{2s} = I_{12}$

يمثل Oa ، χ بمقياس رسم التيار ، I_1

يمثل O′O ، بمقياس رسم التيار ، تيـار اللاحمل I_o بمركبتيه I_{ou} , I_{oa}

يمثل Pa ، بمقياس رسم القدرة ، قدرة المخرج P_2

يمثل Pb ، بمقياس رسم عزم الدوران ، عزم الدوران الكلى T

يمثل Cd ، بمقياس رسم القدرة، المفقودات الميكانيكية والحديدية

يمثل Pd ، بمقياس رسم القدرة ، قدرة المدخل للمحرك P_1

هذا ولا ننصح باستخدام مخطـــط الدائرة للحصول على المفقودات النحاسية، فى كل من ملفات العضو الدائر ، وملفات العضو الثابت، لصغر

الأطوال الممثلة لها ، كما يستحسن عدم استخراج قيمة P_g منه أيضا ، بسبب التقريبات التى سبقت الأشارة إليها . ولكن يمكن أن نحصل منه ايضا على عزم دوران البدء الذى يمثله AB بمقياس رسم عزم دوران ، كما ذكرنا من قبل . هذا ، ويستلزم حصولنا على قيمة النهاية العظمى للقدرة ، وقيمة النهاية العظمى لعزم دوران المحرك ، أن نوجد أقصى مسافة رأسية بين كل من خطى القدرة وعزم الدوران والدائرة ، على الترتيب . ويمكن تحقيق ذلك باسقاط عمود ، من مركز الدائرة m ، على كل من الخطين ، فنحصل على النقطة P_{max} على محيط الدائرة ، التى تحدد مع خط القدرة قيمة النهاية العظمى لقدرة المحرك ، وكذلك على النقطة T_m ، التى تحدد مع خط عزم الدوران قيمة النهاية العظمى لعزم الدوران ، كما هو مبين على مخطط الدائرة فى شكل (٨ - ١) .

يمكن استخدام مخطط الدائرة للحصول على قيمة الانزلاق s ، عند نقطة التشغيل المعينة ، بالرسم أيضا ، النحو التالى : يوصل FA ، ويمد على استقامته إلى أيه نقطة اختيارية مثل L . يسقط عمود على خط القدرة AB ويمد حتى يقابل قطر الدائرة O'F فى H . يوصل FP ، فيقطع LH فى E . فتكون قيمة الانزلاق s ، عند النقطة التشغيل P ، عبارة عن النسبة $\frac{EH}{HL}$.

(٧ - ١) رسم مخطط الدائرة من بيانات التصميم:

(Drawing of the circle diagram from design data)

يمكن أن تمدنا بيانات التصميم للمحرك بالمعلومات الكافية لرسم مخطط الدائرة له ، الذى نستطيع أن نستخدمه فى الحصول على خواص التشغيل المختلفة . وتشمل بيانات التصميم ، اللازمة فى هذه الحاله ، ثوابت المحرك R_1, X_1, R_2, X_{20} ، ونسبة التحويل بين الملفين الابتدائى والثانوى $\alpha = T_1 k_{w1} / T_2 k_{w2}$ ، ثم تيار اللاحمل I_o وزاوية اختلافه المرحلى مع ضغط

الينبوع المرحلى V_1 ، أو تيار المغطسة I_{ou} والمفقودات الحديدية والميكانيكية التي يمكن أن نستخدمها في الحصول على تيار المفقودات I_{oa} .

ويكون رسم مخطط الدائرة ، فى هذه الحالة ، على نفس المنوال ، الذى سبق شرحه فى البند السابق . ويلاحظ أنه عند عدم معرفة سرعة التزامن للمحرك ، نتيجة للجهل بعدد الأقطاب أو التردد ، فاننا نستطيع اتخاذ مقياس رسم لعزم الدوران بوحدة الوات المتزامن ، وهو نفس مقياس رسم القدرة بالوات . وعلى هذا الاساس فان كل وات متزامن (synchronous watt) يساوى ($9.81 \times 1 / 2\pi \frac{n_s}{60}$) كجم متر .

(٨ - ١) رسم مخطط الدائرة من بيانات الاختبار :

(Drawing of the circle diagram from test data)

يمكن ، كما هو الحال بالنسبة للآلات الكهربية التي درسناها حتى الآن ، استنباط خواص تشغيل المحرك التأثيرى ثلاثى المراحل عن طريق عمل اختبارى الدائرة المفتوحة (أو اللاحمل) ودائرة القصر للمحرك . ويتم ذلك ، فى الحقيقة ، بالحصول على المعلومات اللازمة لرسم مخطط دائرة المحرك من هذين الاختبارين ، ثم استغلال مخطط الدائرة بعد ذلك لتحديد خواص التشغيل المطلوبة .

نبدأ أولا بشرح طريقة اجراء كل من الاختبارين ، والمعلومات التى نحصل عليها منهما ، ثم نستطرد بعد ذلك إلى شرح طريقة رسم مخطط الدائرة ، باستخدام المعلومات التى حصلنا عليها .

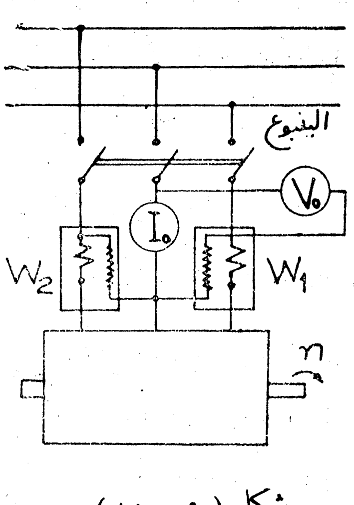
أ ـ اختبار اللاحمل (اختبار الدائرة المفتوحة) :

No load test (open circuit test)

إن تسمية هذا الاختبار باختبار الدائرة المفتوحة يشير إلى أننا نعتبر أن

$s = o$ ، أو صغيرة جـدا ، بحيث يصبح حـد المقاومة $R'_2 \frac{(1-s)}{s}$ فى الدائرة المـكافئة كبيرا جدا ، مما يؤدى إلى اعتبـار الدائرة مفتوحة فى هذه الحـالة .

يوصل المحرك إلى ينبوع ضغطه المعتاد(الضغط المقنن rated voltage) كما هو مبين فى شكل (٩ – ١) ، وذلك عن طريق الأجهزة التى نحتاج إليها



شكل (٩ – ١١)

لرصد المعلومات اللازمة ، حيث نقيس القـــدرة فى هذه الحالة باستخدام الواتمترين فقط (هندسة الآلات الكهربية ص ٢٠٢ و ٢٠٣). يدار المحرك بدون الحمل ، وترصد قراءات الأجهزة ، مع مراعاة أن يكون ضغط الينبوع المرحلى مساويا مقنن ضغط المحرك المرحلى بالضغط V_1 . نحصل ، فى هذه الحالة ، على النتائج الآتية :

$W_o = W_1 + W_2$ (قدرة اللاحمل) ، $I_o =$ (تيار اللاحمل)

$$\cos \Phi_o = \frac{W_o}{\sqrt{3}\, V_o I_o}, \qquad V_1 = \frac{V_o}{\sqrt{3}}$$

يمكننا أن نعتبر أن W_0 تساوى تقريباً مفقودات الحديد والمفقودات الميكانيكية

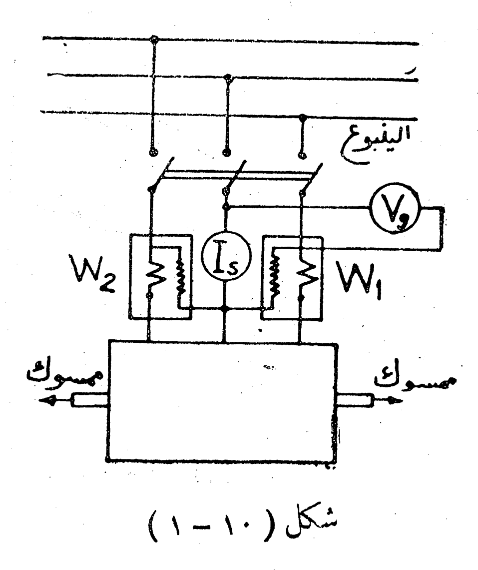
$$I_{oa} = I_o \cos \Phi_o \quad , \quad R_o = \frac{V_o}{\sqrt{3}\, I_{oa}}$$

$$I_{ou} = I_o \sin \Phi_o \quad , \quad X_o = \frac{V_o}{\sqrt{3}\, I_{ou}}$$

ب ـ اختبار دائرة القصر (short circuit test) :

يسمى هذا الاختبار ، فى بعض الاحيان ، باسم اختبار العضو الدائر الممسك (locked rotor test) ، أو اختبار التسكين (standstill test) ، إذ أن أساس اجراء الاختبار أن تؤخذ القراءات والعضو الدائر فى حالة السكون التام (s = 1) ، لأن هذا هو شرط وجود المحرك فى حالة القصر ، كما سبق شرحه .

لذلك يراعي فرملة المحرك بأية وسيلة مناسبة لمنعه من الدوران عند توصيله الى الينبوع ، الذى يكون ضغطه منخفضا فى هذه الحالة بحيث تكون قيمة تيار القصر فى حدود قيمة تيار الحمل الكامل تقريبا . وتدخل الأجهزة اللازمة ، لأخذ القراءات المطلوبة ، فى دائرة التوصيل ، كما هو مبين فى شكل (١٠ — ١) .



شكل (١٠ – ١)

نحصل في هذه الحالة على قيمة تيـار القصر I_s ، عند استخدام الضغط المنخفض V_s ، اللازم لاجراء التجربة بدون الحـاق أية أضرار بالمحرك .
و لكى نحصل على تيار القصر المعتاد للمحرك I'_{2sc} ، نفترض أن $R_1, R'_2 X_1, X'_2$) ثابتة القيمة ، كما سبقت الاشارة إليه ، فتكون قيمة تيـــار القصر للمحرك متناسبة مع قيمة الضغط المرحلى ، ونجد أن :

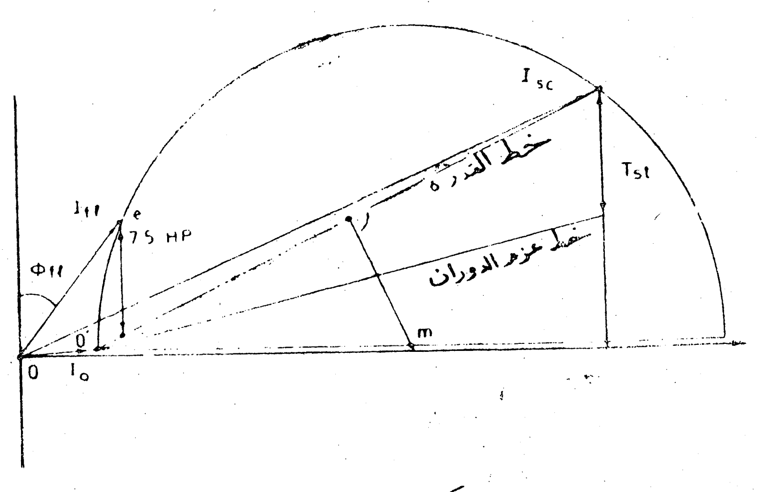
$$I'_{2sc} = I_s \times \frac{\sqrt{3}\, V_1}{V_s}$$

$$W_s = W_1 + W_2 \;\; (\text{قدرة القصر}), \quad \cos \Phi_{2sc} = \frac{W_s}{\sqrt{3}\, V_s\, I_s}$$

$$Z_{1eq} = \sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_{20})^2} = \frac{V_s}{\sqrt{3}\, I_2}$$

$$(R_1 + R_2) = Z_{1eq} \cos \Phi_{2sc}$$

و بقياس المقاومة المرجليه للمفـــات العضو الثابت بأية طريقة بسيطة باستخدام التيار المستمر، وأخذ تأثير التياز المتردد فى الاعتبار ، يمكننا تحديد قيمة كل من R_1 ، R_2' على حدة .



شكل (١١- ١)

حـ ـ رسم مخطط الدائرة للمحرك باستخدام نتائج الاختبارين :

يبين شكل (١١ ـ ١) كيف نستفيد بالنتائج السابقة لرسم مخطط الدائرة للمحرك على النحو التالى :

I_o ، Φ_o تحددان النقطة O' ، بالنسبة لنقطة الأصل المختارة O . I'_{2sc} ، ϕ_{2sc} تحددان النقطة A .

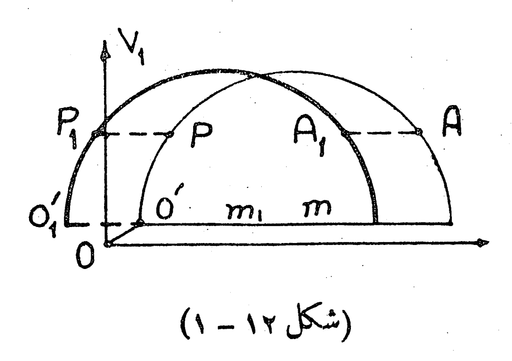
نصل $O'A$ ونقيم من منتصفة عمودا لكى يقابل الخط الأفقى المرسوم من O' فى النقطة m مركز الدائرة ، فيكون $O'm$ هو نصف قطر الدائرة المطلوبة .

(٩ ـ ١) مخطط الدائرة عند استخدام مكثفات لتحسين معامل القدرة :

يكون معامل قدرة المحرك ثابتا . وقد يكون منخفضا فى بعض الاحيان لدرجة يتحتم فيها علينا (بايعاز من الهيئة التى تمدنا بالقدرة الكهربية) استخدام مكثفات توصل على التوازى مع المحرك فتعمل على تحسين قيمة معامل قدرة التيار الكلى المأخوذ من الينبوع (هندسة الآلات الكهربية مثال (٣) ص ٢٠٨) . ولا يتأثر التيار الذى يأخذه المحرك من الينبوع ، بطبيعة الحال، بوجود مثل هذه المكثفات ، ونحصل عليه من مخطط الدائرة للمحرك ، على نفس المنوال السابق بالضبط .

أما بالنسبة للتيار الكلى، وهو ما يهمنا من ناحية القيمة ومعامل القدرة بالنسبة لاشتراطات الهيئة التى تبيع لنا التيار ، فاننا نستطيع أن نرسم له هو مخطط دائرة على نمط مخطط الدائرة للمحرك ، بحيث تتناظر على الدائرتين دائما نقطتان (O,O_1 ـ O',O_1' ـ P,P_1 ـ A,A_1) ، تعطيان تيار المحرك، والتيار الكلى فى الينبوع . ويتم رسم الدائرة الجديدة من مخطط الدائرة الأصلى

للمحرك ، بنقلها كما هى بزيها افقيا إلى اليسار بالقيمة المناظرة للتيار المرحلى للمكثف ، كما هو مبين فى شكل (١٢ — ١).



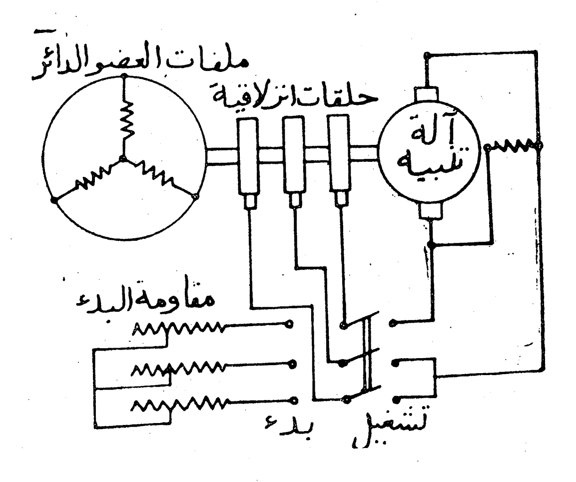
(شكل ١٢ — ١)

(١٠ — ١) المحرك المتزامن التأثيرى (The synchronous induction motor)

سبق أن ذكرنا أن سرعة المحرك التأثيرى n لا يمكن أن تصل فى قيمتها إلى سرعة التزامن n_s ، نظرا لأن التيار التأثيرى الذى يتوقف عليه عزم دوران المحرك ينعدم فى هذه الحالة ، عندما تساوى سرعة المجال المغناطيسى الدائر بالنسبة لملفات العضو الدائر صفرا (s=o) .

فاذا أردنا أن نصل بسرعة المحرك إلى قيمة سرعة التزامن ، وهو ما يشبه اجراء عملية تزامن له ، يجب علينا أن نزود ملفات العضو الدائر بتيار التنبيه اللازم لانشاء عزم الدوران المطلوب لاستمرار دوران المحرك عند سرعة التزامن . ويسمى مثل هذا المحرك ، الذى يعمل كمحرك تأثيرى فى البداية (فترة البدء) ، ثم يتحول إلى محرك متزامن بعد ذلك بتوصيل تيار تنبيه مستمر إلى ملفات العضو الدائر ، باسم المحرك المتزامن التأثيرى . ويمكن اعتباره محركا متزامنا يستعان على بدئه بتشغيله كمحرك تأثيرى ، فى خلال فترة البدء .

يبين شكل (١٣ — ١) كيفية اعداد المحرك لكى يعمل على هذا المنوال ،



شكل (١٣ – ١)

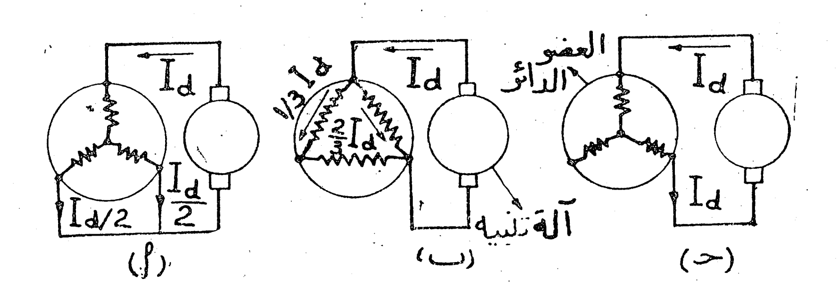
حيث يمكن توصيل ملفات العضو الدائر ، فى خلال فترة البدء ، إلى مقاومات البدء ناحية اليسار المشار إليها بكلمة بدء ، حتى إذا ما وصل المحرك إلى سرعته المعتادة ، وهى قريبة جدا من سرعة التزامن ، يحول المفتاح على ناحية التشغيل إلى اليمين ، لكى يأخذ تيـــار التنبيه اللازم لادارته كمحرك متزامن من آلة التنبيه المعدة لهذا الغرض .

ومن الطبيعى أن يمر المحرك بفــترة تلاشى ، ينتقل فيها من حالة التشغيل كمحرك تأثيرى ، إلي حالة التشغيل كمحــرك تزامن ، تكون هى حالة الدوام .

ويمكن تلخيص ما يحدث فى خلال فترة التلاشي كما يأتى : ينشيء التيار المستمر عند مروره فى ملفات العضو الدائر مجالا مغناطيسيا يكافىء المجـال المغناطيسى الذى ينشئة التيـار التأثيرى المار فى ملفات العضو الدائر ، وهو الذى يعطى عزم الدوران اللازم لادارة المحرك التأثيرى . يترابط هـذا المجال المغناطيسى الجديد بالمجال المغناطيسى الدائر لملفات العضو الثابت ، تمـاما كما

يحدث فى حالة المحرك المتزامن عندما يدار حتى يصل إلى قرب سرعة التزامن ، ثم يمر تيار التنبيه فى ملفات المجال لكى يحدث الترابط بين اقطاب المجال المغناطيسى الدائر والأقطاب الرئيسية على العضو الدائر ، فتتم عملية التزامن ، كما سبق شرحه (ص ٢٤٤ إلى ص ٢٤٦ من كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية) .

يلزم ، على هذا الأساس ، ايجاد العلاقة بين قيمة التيار التأثيرى الفعالة I وتيار التنبيه المستمر I_d المكافىء له . ويتوقف شكل هذه العلاقة ، بطبيعة الحال ، على كيفية توصيل آلة التنبيه إلى ملفات العضو الدائر ، وكذلك نوع توصيل هذه الملفات ، كنجمة أو دلتا .



شكل (١٤ – ١)

يبين شكل (١٤ – ١) أنواع التوصيلات المألوفة فى هذا المضمار . ويتضح أنه في شكل أ تكون قيمة التيار I_d في ملفات المرحلة الأولى ضعف قيمتيه المتساويتين $I_d/2$ فى ملفات المرحلتين الآخرين ، وهى الحالة المماثلة لتوزيع التيار الخطي فى الملفات ثلاثية المراحل عندما يكون التيار في ملفات المرحلة الأولى في قيمة النهاية العظمى له $I_m = \sqrt{2}\,I$. هذا يعنى أن $I_d = \sqrt{2}\,I$ ، أو أن $I = 0.707 I_d$ ، فى هذه الحالة .

تجد فى شكل ب أن قيمة التيار $\frac{2}{3} I_d$ في ملفات المرحلة الأولى ضعف

قيمته المتساويتين $\frac{1}{3} I_d$ في ملفات المرحلتين الأخريين ، وهى حالة مماثلة للحالة السابقة تماما ، باعتبار أن التيار $\frac{2}{3} I_d$ حل محل التيار I_d . وهذا يعنى أن $\sqrt{2}\, I = \frac{2}{3} I_d$ ، أو أن $I = 0.47 I_d$ ، فى هذه الحالة .

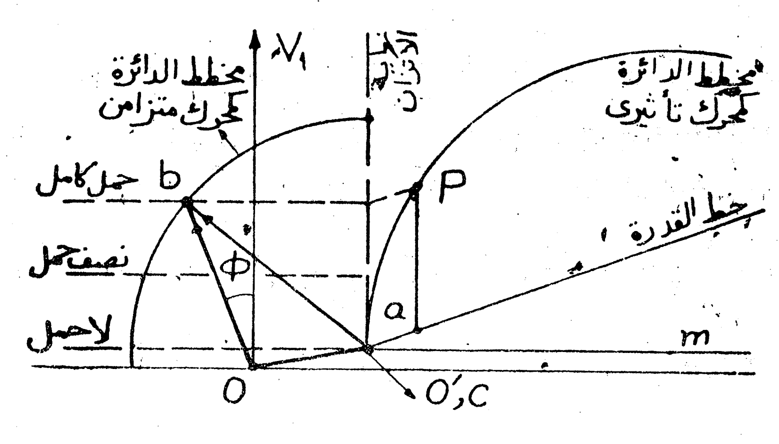
أما فى شكل حـ فان قيمة التيار تكون واحدة وهى I_d فى كل من ملفات المرحلتين الأولى والثانية ، بينما تكون قيمة التيار صفرا فى المرحلة الثالثة . وهى الحالة المماثلة لتوزيع التيار اللحظى فى الملفات ثلاثية المراحل عندما تكون قيمة التيار اللحظية في كل من ملفات المرحلة الأولى والثانية $\frac{\sqrt{3}}{2} I_m = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} I$

وقيمة التيار اللخطية فى المرحلة الثالثة تساوى صفرا . هذا يعنى أن

$I_d = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}\, I$ ، أو أن $I = 0.82\, I_d$ ، فى هذه الحالة .

عندما يعمل المحرك متزامنا يكون المحل الهندسى لطرف التيار المرحلى فى ملفات المنتج عبارة عن دائرة ، وذلك إذا ظل تيار التنبيه ثابتا عند قيمة معينة ، كما سبق شرحه بالتفصيل بالاشارة إلى شكل (١٦ – ٤) ص ١٣٢ من كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية . وفى هذه الحالة يمثل المستقيم oc التيار V_1 / Z_s، الذى يصنع مع متجه الضغط V_1 الزاوية $\theta = \tan^{-1} \frac{X_s}{R}$.
ومن الواضح أنه بالنسبة للمحرك التى كان تأثيريا واصبح متزامنا تكون معاوقة التزامن هى نفسها معاوقة التمغطس المبينة فى الدائرة المكافئة للمحرك بالحدين R_o , X_o فى شكل (٧ – ١) ، وهـذا يعنى أن V_1 / Z_s للمحرك المتزامن هى نفسها I_o للمحرك التأثيرى ، بحيث يشترك مخطط الدائرة للمحرك وهو تأثيرى مع المتجهات للمحرك وهو متزامن ، كما هو مبين فى شكل (١٥ – ١) ، معا فى الخط oc الذى يمثل V_1 / Z_s للحالة الأولى، والخط OO' ، الذى يمثل I_o للحالة الثانية . بذلك تنطبق النقطة O' فى مخطط دائرة المحرك

التأثيرى ، على النقطة c ، فى مخطط متجهات المحرك المتزامن ، كما هو مبين فى شكل (١٥ – ١) ٠



شكل (١٥– ١)

فاذا رسمنا مخطـــط الدائرة للمحرك وهو تأثيرى بالطريقة التقليدية ، وكانت النقطة P شكل (١٥ – ١) على محيـط الدائرة تمثل نقطة التشغيل ، وكان Pa يمثل قدرة الخرج عند الحمل الكامل ، فان OP يمثل التيار المرحلى فى ملفات العضو الثابت عند الحمل الكامل ايضا ، كما سبق باشر حةبالتفصيل بالنسبة لمخطط دائرة المحرك التأثيرى ٠

بالنسبة لمخطط متجهات المحرك وهو متزامن ، فان مستويات القـــدرة الميكانيكية تكون عبارة عن دوائر يقع مركزها على الخط الرأسي المقام من O ، ويبعد عنها بالمسافة الرأسيةالتى تمثل التيار V/2R ٠ فاذا كانت R صغيرة جـــدا ، بحيث يمكن ان نساويها بالصفر ، فان مركز الدوائر يقع فى ما لانهاية ، وتؤول هذه الدوائر إلى خطوط مستقيمة ، هى مستويات قدرة الخرج المختلفة ، كما سبق شرحه بالنسبة للمحرك المتزامن . بذلك يمكن رسم خـــط مستوى قدرة الخرج للحمل الكامل ، فى حالة المحرك المتزامن ،

باستغلال وضع النقطة P ، والمسافة Pa ، التي تمثل قدرة المخرج عند الحمل الكامل ، للمحرك التأثيرى ، كما هو مبين فى شـــكل (١٥ - ١) .لكى نستطيع تحديد نقطة الحمل الكامل b ، ثم نعين التيار المرحلى فى ملفات المنتج للمحرك ، وهو متزامن ، يجب أن نرسم دائرة التذبيه الثابت للمحرك ، التى تناظر التذبيه الثابت E_o/Z_s والتى تتقاطع مع الخط ، الذى يمثل مستوى قدرة الحمـــل الكامل فى النقطة المطلوبة . يكون تيـار التذبيه المطلوب E_o/Z_s ، للمحرك المتزامن ، هو في الواقع التيار التأثيرى I ، المكافيء لتيار التذبيه المستمر I_d ، كما سبق حسابه من قبل ، ويمثله cb نصف قطر مخطط دائرة المحرك المتزامن . بذلك يمكن تحديد نقطة التشغيل b ، كمحرك متزامن ، عند الحمل الكامل ، بمعلومية قدرة المخرج ، وتيار التذبيه I_d ، وذلك بالنسبة لمخطط دائرة المحرك التأثيرى ، ثم الحصول على التيار المرحلي ، فى منتج المحرك المتزامن ، الذى يمثله المتجه ob ، في هذه الحالة .

أمثـــلة محـــلولة :

(1) The power input to the rotor of a 440 V 50 HZ, 6 pole, 3 - phase induction motor is 80 KW. The rotor electromotive - force is observed to make 100 complete alternations per minute. Calculte ; (a) the slip , (b) the rotor speed, (c) the total mechanical power devloped (d) the rotor copper losses per phase : (e) the rotor resistance per phase if the rotor current is 65 A .

$$P_{12} = P_g = 80000 \text{ W}$$

(a) $S = \dfrac{100}{60 \times 50} = 0.033 = 3.3 \%$

(b) $n = n_s (1 - s) = 1000 (1 - 0.033) = 967$ r.p.m.

(c) $P_m = P_{12}(1-s) = 80000 \times 0.967 = 77360$ W
$= 103.6$ HP

(d) $P_{cu2} = 3\, I_2^2\, R_2 = s\, P_{12} = 0.033 \times 80000 = 2640$ W

rotor copper losses per phas $= I_2^2\, R_2 = \frac{2640}{3} = 880$ W

(e) $R_2 = \frac{880}{I_2^2} = \frac{880}{4220} = 0.208$ ohm

(2) A 3000 V, 16 pole, 50 Hz, 3 phase, delta connected induction motor has a slip ring rotor which has a resistance of 0.02 ohm and a stand still reactance of 0.3 ohm per phase. The ratio of stator to rotor turns is 3. The full load torque is obtained at 362 r.p.m., calculate :

(a) the full load torque ; (b) the maximum torque and the speed at which it occurs ; (c) the full laod rotor copper losses ; (d) the resistance which mnst be added to each rotor phase to give maximum torque at starting.

$X'_{20} = 0.3 \times 9 = 2.7$ ohms , $n_s = \frac{60\, f}{p} = \frac{3000}{8}$

$n_s = 375$ r. p. m.

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{375 - 362}{375} = 0.0347 = 3.47\%$$

$$K_t = \frac{3p\, E_1^2}{2\pi\, f\, X'_{20} \times 9.81} = \frac{9 \times 10^6 \times 8}{314 \times 2.7 \times 9.81}$$

$= 8660$ Kg. m.

يلاحظ أننا إستخدمنا الضغط المرحلى $V_1 = 3000$ (يساوى الضغط الخطى لأن التوصيل دلتـــا) بدلا من E_1 باعتبارهما متساويان تقريباً ، فنكون قد أهملنا هبوط الضغط فى الملفات الابتدائية .

$$\alpha = S = \frac{R_2}{X_{20}} = \frac{0.02}{0.3} = 0.067$$

(a) $$T_{fl} = K_t \times \frac{S\alpha}{S^2 + \alpha^2} = 8660 \frac{2.31 \times 10^{-3}}{12 \times 10^{-4} + 44.5 \times 10^{-4}}$$

$$= 3550 \text{ Kg. m.}$$

(b) $$T_{max} = \tfrac{1}{2} K_t = 4330 \text{ Kg. m.}$$

$$n_{max} = n_s (1 - S_m) = 375 \times 0.933 = 352 \text{ r. p. m.}$$

(c) $$P_g = T\omega_s = 3550 \times \frac{2\pi n_s}{60} \times \frac{9.81}{1000} = 1370 \text{ KW}$$

$$P_{cu2} = s P_g = 1370 \times 0.0347 = 47.5 \text{ KW}$$

(d) $$R_{st} = X_{20} - R_2 = 0.3 - 0.02 = 0.28 \text{ ohm}$$

(3) a 3 phase induction motor has a 4 - pole, star connected stator winding and runs on a 220 V, 50 Hz supply, at 0.866 power factor. The rotor has resistance and reactance per phase 0.1 ohm and 0.9 ohm respectively. The ratio of stator to rotor turns is 1.75. Find, for a slip of 5%, the total torque developed, the rotor copper losses, and the mechanical power. Find also the maximum torque and the speed at which it occurs. If the mechanical losses are 700 watts, and the stator losses 500 watts, find the efficiency and line current. Neglect stator impedance drop

$$X'_{20} = 0.9 \times (1.75)^2 = 2.754 \text{ ohms}, \quad n_s = \frac{3000}{2}$$

$$n_s = 1500 \text{ r. p. m.}$$

$$K_t = \frac{3 \times 2 \times (127)^2}{2\pi \times 50 \times 2.754 \times 9.81} = 11.4 \text{ Kg. m.}$$

$$T_{max} = \frac{K_t}{2} = 5.7 \text{ Kg.m.} \quad , \quad S_m = \alpha = \frac{0.1}{0.9} = 0.111$$

$$n_{max} = 1500 \; (1 - 0.11) = 1330 \text{ r.p.m.}$$

$$T = K_t \frac{S \alpha}{S^2 + \alpha^2} = 11.4 \frac{0.11 \times 0.05}{0.0121 + 0.0025} = 4.29 \text{ Kg.m.}$$

$$n = n_s \; (1 - S) = 1500 \; (1 - 0.05) = 1425 \text{ r.p.m.}$$

$$P_m = T\omega = 4.29 \times \frac{2\pi \times 1425}{60} \times 9.81 = 6280 \text{ W}$$

$$= 8.41 \text{ HP}$$

$$P_g = \frac{P_m}{1 - S} = \frac{6280}{0.95} = 6610 \text{ W}$$

$$P_{cu2} = SP_g = 6610 \times 0.05 = 330.5 \text{ W}$$

$$P_1 = P_g + P_{st} = 6610 + 500 = 7110 \text{ W}$$

$$P_2 = P_m - P_f = 6280 - 700 = 5580 \text{ W}$$

$$\text{fficiency} = \frac{5580}{7100} = 78.6 \%$$

$$I_L = \frac{7100}{\sqrt{3} \times 220 \times 0.866} = 21.5 \text{ amps.}$$

(4) A 3 phase, 12 pole, star connected inductiou motor has a final output of 450 H.P when connected to 2000 V, 50 c/s supply and runs with a slip of 3%. the stator losses are 6.7 KW and the mechanical losses are 7.5 KW. If the power factor is 0.85, find the line current, the full load torque and the speed of the motor.

If the equivaleut rotor reactance per phase, referred to the

stator is 2 ohms, find the value of the maximum torque and the approximate value of the speed at which it occurs. Neglect voltage drop on the stator side.

$$P_m = 450 \times 0.746 + 7.5 = 343.5 \text{ KW}$$

$$, \; n_s = \frac{3000}{6} = 500 \text{ r.p.m.}$$

$$P_g = \frac{343.5}{0.97} = 354 \text{ KW} \quad , \quad (1 - S = 0.97)$$

$$P_1 = 354 + 6.7 = 360.7$$

$$I_1 = \frac{360.7 \times 1000}{\sqrt{3} \times 2000 \times 0.85} = 122.6 \text{ Amps.}$$

$$T = \frac{P_m}{\omega} = \frac{P_g}{\omega_s} = \frac{354 \times 1000 \times 60}{2\pi \times 500 \times 9.81} = 688 \text{ Kg.m}$$

$$n = n_s\,(1 - S) = 500 \times 0.97 = 485 \text{ r.p.m.}$$

$$T_{max} = \tfrac{1}{2} K_t = \frac{6 \times 4 \times 10^6}{2\pi \times 50 \times 2 \times 9.81} = 1930 \text{ Kg.m.}$$

$$\frac{T}{T_{max}} = \frac{688}{1930} = \frac{0.03 \propto}{0.0009 + \propto^2} \simeq \frac{0.03}{\propto} \; (\propto^2 >> S^2)$$

$$\therefore \propto \simeq 0.084 \quad , \quad S_m \simeq 0.084$$

$$n_m = n_s\,(1 - S_m) \simeq 500 \times 0.916 \simeq 458 \text{ r.p.m.}$$

(5) A 3 phase, 8 pole, delta connected induction motor has an input of 15 KW at a power factor of 0.85 and runs at a speed of 720 r.p.m. when it is connected to a 220 V, 50 c/s supply

The mechanical losses are 1.2 H.P. and the efficiency is 0.84. Find the phase and line currents, the slip, the rotor copper losses and the stator losses.

If the ratio of maximum to full load torque is 2.5, find the value of the maximum torque and the speed at which it occurs.

Find also tha values of the rotor resistance and standstill reactance per phase, rsferred to stator side.

Neglect the voltage drop in the stator.

$$I_L = \frac{15 \times 1000}{\sqrt{3} \times 220 \times 0.85} = 46.25 \text{ A}, \quad I_{ph} = \frac{46.25}{\sqrt{3}} = 26.7 \text{A}$$

$$P_2 = 15 \times 0.84 = 12.6 \text{ KW} = 16.89 \text{ HP}$$

$$P_m = 16.89 + 1.2 = 18.09 \text{ HP} = 13.52 \text{ KW}$$

$$n_s = \frac{3000}{4} = 750 \text{ r.p.m.}, \quad S = \frac{750 - 720}{750} = 0.04$$

$$P_g = \frac{P_m}{1 - S} = \frac{13.52}{0.96} = 14.08 \text{ WK}$$

$$P_{cu2} = S\, P_g = 14.08 \times 0.04 = 0.5632 \text{ KW}$$

$$\text{Stator losses} = P_1 - P_g = 15 - 14.08 = 0.92 \text{ KW}$$

$$T_{fl} = \frac{P_g}{\omega_s} \frac{14080 \times 60}{2\pi \times 720 \times 9.81} = 18.25 \text{ Kg.m.}$$

$$T_m = 18.25 \times 2.5 = 45.7 \text{ Kg.m.}$$

$$\frac{T_{fl}}{T_m} = \frac{2s \propto}{S^2 + \propto^2}, \quad 0.2 = \frac{0.04 \propto}{0.0016 + \propto^2}$$

$$\therefore \quad 0.032 + 20 \propto^2 - 4 \propto = 0$$

$$\propto = \frac{4 \pm \sqrt{16 - 2.56}}{40} = 0.1915$$

$$n_m = 750\ (1 - 0.1915) = 606 \text{ r.p.m.}$$

$$T_m = \frac{1}{2} K_t = \frac{1}{2} \frac{3\ p\ E_1^2}{2\pi f\ X'_{20} \times 9.81}$$

$$45.7 = \frac{1}{2} \frac{12 \times 16150}{314\ X'_{20} \times 9.81}, \quad X'_{20} = 0.686 \text{ ohm}$$

$$R'_2 = \propto X'_{20} = 0.1915 \times 0.686 = 0.132 \text{ ohm}$$

(6) A 3 phase, 6 pole, star connected induction motor has an output of 7.5 H.P., when supplied from 220 V, 50 c/s supply. When tested on no load at rated voltage, the motor takes 270 W and a current of 10 A from the supply. With the rotor blocked, the motor takes a current of 21 A and a power of 800 W, when connected to a 55 V supply. Draw the circle diagram and determine from it the full load line current and power factor. Find also the starting torque assuming equal stator and referred rotor resistance.

$$I_0 = 10 \text{ A}, \quad \cos \phi_0 = \frac{270}{\sqrt{3} \times 10 \times 220} = 0.0707$$

$$I_{sc} = 21 \times \frac{220}{55} = 84 \text{ A}$$

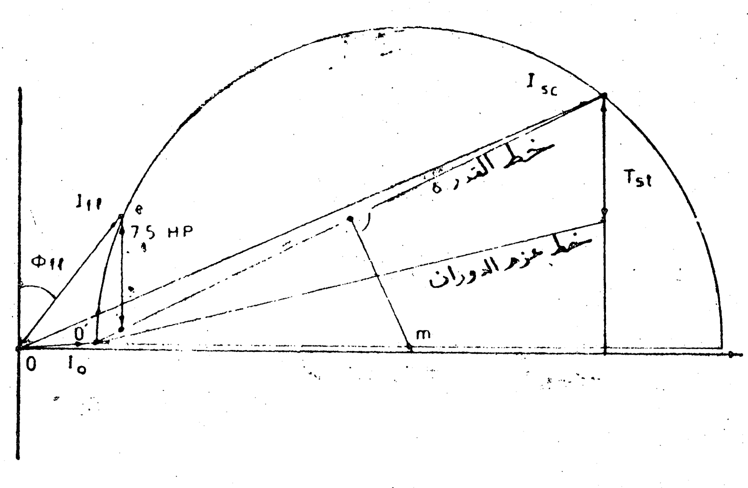
$$\cos \phi_{sc} = \frac{800}{\sqrt{3} \times 55 \times 21} = 0.4$$

Scales: 1 cm = 5 amps

$$I \text{ cm} = 5 \times \sqrt{3} \times 220 \text{ W} = \frac{5 \times \sqrt{3} \times 220}{746}$$

$$= 2.55 \text{ HP}$$

$$I \text{ cm} = \frac{5 \times \sqrt{3} \times 220}{2\pi \times \frac{1000}{60} \times 9.81} = 1.855 \text{ Kg.m.}$$



(شكل ١م)

$I_0 = 10$ A represented by $\frac{10}{5} = 2$ cms

$I_{sc} = 84$ A repersented by $\frac{84}{5} = 16.8$ cms

output $= 7.5$ HP represented by $\frac{7.5}{2.55} = 2.94$ cms

يبين شكل (١ م) مخطط الدائرة للمحرك مرسوما باستخدام المعلومات السابقة . ويلاحظ أن رسم خط عزم الدوران (Torque line) يحتاج إلى معرفة نسبة المفقودات النحاسية فى كل من الملفات الابتدائية والثانوية ، ونظراً لعدم ورود أى ذكر عن هذه النسبة ، فاننا نعتبرها مساوية للواحد الصحيح ، وهذا تقليد متبع ومطابق للواقع العملى إلى حد كبير .

نحصل من الرسم بعد تحديد نقطة التشغيل عند الحمل الكامل (e) على أساس القدرة 7.5 حصان على المعلومات الآتيه :

$I_{fl} = 4.35 \times 5 = 21.75$ Amps

(لاحظ أن الرسم المعطي في الشكل مصغر بنسبة ١ : ٢)

$\cos \phi_{fl} = 0.8$

$T_{st} = 3.25 \times 1.855 = 6.025$ Kg.m.

(7) A 3-phase induction motor has a 10 pole, star connected, stator winding, which is connected to a 2000 V, 50 Hz supply. The rotor resistance is 0.023 ohm, and standstill reactance 0.16 ohm per phase. The ratio of stator to rotor turns is 5.5 and the full load torque developed is 181 Kg. m.If the stator has a reactance of 4 ohms and a resistance of 0.7 ohm per phase, and the motor takes a current of 15 amps. at 0.07 power factor on no load, draw the circle diagram and determine from it the fnll load current and power factor. Determine also the starting torque, the ratio maximum tc full load torque and the speed at which maximam torque occurs.

$$V_{ph} = \frac{2000}{\sqrt{3}} = 1150 \text{ V}, \quad \propto = \frac{R_2}{X_{20}} = \frac{0.023}{0.16} = 0.144$$

$$n_s = \frac{3000}{5} = 600 \text{ r.p.m.}, \quad n = 600 \times 0.98 = 588 \text{ r.p.m.}$$

$$n_m = 600 \times 0.856 = 514 \text{ r.p.m.}$$

$$X'_{20} = 0.16 \times (5.5)^2 = 4.85 \text{ ohms}$$

$$P_m = T_{fl}\, \omega = 181 \times \frac{9.81}{1000} \times 2\pi \times \frac{588}{60} \simeq 110 \text{ KW}$$

$$\frac{T_m}{T_{fl}} = 1.8$$

$$R'_2 = 0.025 \times (5.5)^2 = 0.697 \text{ ohm}$$

$$X_{1eq} = X_1 + X'_{20} = 4 + 4.85 = 8.85 \text{ ohms}$$

I_d (قطر الدائرة) $= \dfrac{1150}{8.85} = 130$ amps.

$$\tan \phi_{sc} = \frac{X_1 + X'_{20}}{R_1 + R'_2} = \frac{8.85}{1.397} = 6.43 \;,\; \phi_{sc} = 81^\circ$$

scales : 1 cm = 10 amps

$$1 \text{ cm} = 10 \sqrt{3} \times \frac{2000}{1000} = 34.6 \text{ KW}$$

$$1 \text{ cm} = \frac{34600}{2\pi \times \frac{600}{60} \times 9.81} = 56.2 \text{ Kg.m}$$

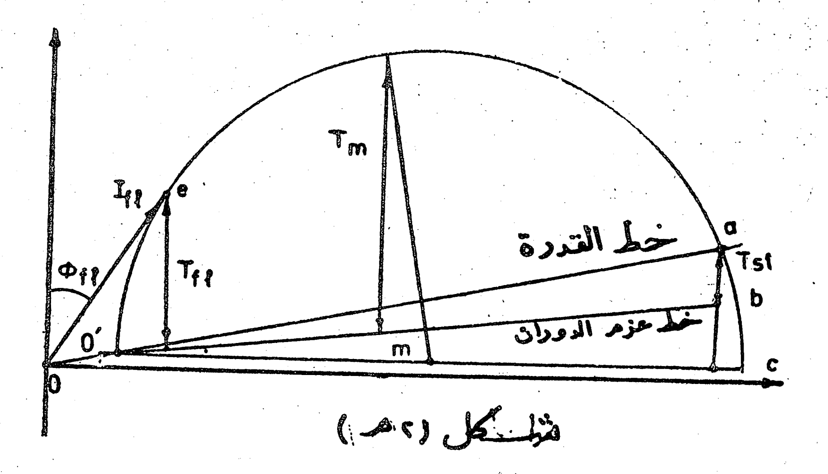
T_{fl} is represented by $\dfrac{181}{56.2} = 3.23$ cms

I_d is represented by $\dfrac{130}{10} = 13$ cms

$$\phi_0 = \cos^{-1} 0.07 = 86^\circ$$

$\dfrac{ab}{bc} = \dfrac{R'_2}{R_1} = \dfrac{0.697}{0.7} = 1$ لتحديد خط عزم الدوران

من المعلومات السابقه يمكننا رسم مخطط الدائرة كما هومبين فى شكل(٢م)



شكل (٢م)

وتحديد نقطه التشغيل عند الحمل الكامل (e) ، ومن هذا المخطط تحصل على المعلومات الآتيه :

$I_{fl} = 43.5$ amps , $\cos \phi_{fl} = 0.8$

$T_{st} = 1.2 \times 56.2 = 67.5$ Kg.m.

(تجب مراعاة أن شكل (٢م) مصغر بنسبة ٢ : ٣)

(8) The following figures were obtained form tests on a 1600 HP, 3 - phase, 50 HZ , 3000 V , 24 pole induction motorti

No load test : 3000 V , 100 amps , 30 KW

Short circuit test (locked rotor test)

1000 V, 445 amps, 170 KW

The resistance per phase of the star connected rotor and stator are 0.14 ohm and 0.24 ohm respectively. Ratio of transformation stator to rotor is 2.4. Draw the circle diagram

of the motor and determine from it : (a) full load current, power factor, efficiency aud torque ; (b) the max torque, the starting torque and the maximum horse power.

$$V_{ph} = \frac{3000}{\sqrt{3}} = 1733 \text{ V}$$

$$\cos\phi_0 = \frac{30000}{\sqrt{3} \times 3000 \times 100} = 0.0577 \ , \quad \phi_0 = 86^\circ \ 42'$$

$$I_{sc} = \frac{3000}{1000} \times 445 = 1335 \text{ amps}$$

$$\cos\phi_{sc} = \frac{170000}{\sqrt{3} \times 1000 \times 445} = 0.2207 \ , \quad \phi_{sc} = 77^\circ \ 12'$$

$$n_s = \frac{3000}{12} = 250 \text{ r.p.m.}$$

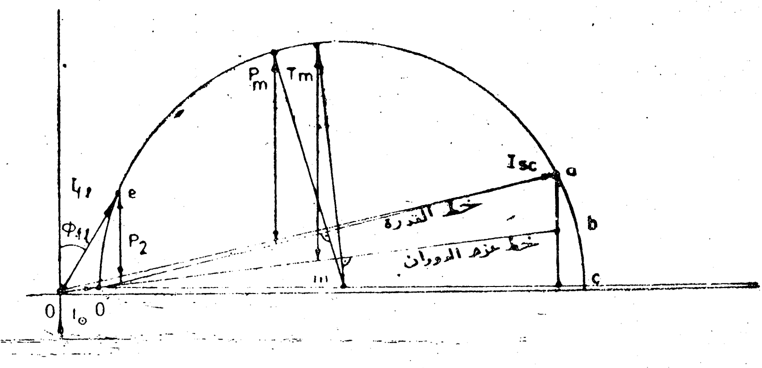
$$R'_2 = 0.024 \times 56.776 = 0.138, \quad \frac{R_1}{R'_2} = \frac{0.14}{0.138} \cong 1 = \frac{ab}{bc}$$

scales : 1 cm = 100 amps

$$1 \text{ cm} = \sqrt{3} \times 3000 \times \frac{100}{1000} = 519.6 \text{ KW}$$

$$1 \text{ cm} = \frac{519600 \times 60}{2\pi \times 250 \times 9.81} = 2020 \text{ Kg.m.}$$

P_2 = 1600 HP = 1192.5 KW represented by 2.3 cms



(شكل ٣ م)

باستخدام المعلومات السابقة يمكننا رسم مخطط المتجهات ، كما هو في شكل ٣ م الذى نحصل منه على ما هو مطلوب ، كما يأتى :

$I_{fl} = 290$ amps , $\cos \phi_{fl} = 0.866$

$T_{fl} = 2.35 \times 2020 = 4750$ Kg.m.

$T_{st} = 1.45 \times 2020 = 2920$ Kg.m.

$P_m = 5 \times 519.6 = 2598$ KW

$T_m = 5.63 \times 2020 = 11400$ Kg.m.

$$P_1 = \sqrt{3} \times \frac{3000}{1000} \times 290 \times 0.866 = 1307 \text{ KW}$$

$$\text{efficiency} = \frac{1192.5 \times 100}{1307} = 91.3 \%$$

(يلاحظ أن الرسم مصغر بنسبة ٢ : ٣)

(9) A 3-phase induction motor has a 4-pole, star connected stator winding, and runs on a 220 V, 50 HZ supply. The rotor resistance and reactance per phase are 0.1 ohm and 0.9 ohm respectively. The ratio of stator to rotor turns is 1.75. The full load slip is 0.05 and the mechanical losses are 0.5 HP. Calculate : (a) the maximum torque aud the speed at which it occurs, (b) the full load torque, (c) the full load output in brake HP, (d) the approximate value of the stator voltage which would give full load at one half of full load speed.

(a) $X'_{20} = (0.9) \times (1.75)^2 = 2.76$ ohms, , $n_s = \frac{3000}{2}$

$= 1500$ r.p.m.

$$T_m = \tfrac{1}{2} K_t = \tfrac{1}{2} \times \frac{3 \times 2 \times \left(\frac{220}{\sqrt{3}}\right)^2}{2\pi\, 50 \times \times 2.76 \times 9.81} = 5.7 \text{ Kg.m.}$$

$$K_t = 2\, T_m = 11.4 \text{ Kg.m.} \quad , \quad \propto = S_m = \frac{R_2}{X_{20}} = 0.111$$

$$n_m = 1500\,(1 - 0.111) = 1333 \text{ r.p.m.}$$

(b) $$T_{f1} = K_t \frac{S \propto}{S^2 + \propto^2} = 11.4 \frac{0.05 \times 0.111}{(0.05)^2 + (0.111)^2} = 4.29 \text{ Kg.m.}$$

(c) Full load power $P_m = P_g\,(1 - S) = \dfrac{P_{cu2}}{S}(1 - S)$

$$P_m = \frac{3\, I_{2s}'^2\, r_2'}{S}(1 - S) \times \frac{1}{746} = \frac{3r_2'}{S}((1 - S)$$

$$\times \frac{1}{746} \times \frac{S^2 E^2}{r_2'^2 + S^2 X'^2_{20}}$$

$$= \frac{3 \times (1.75)^2 \times 0.1 \times 0.95}{746 \times 0.05}$$

$$\times \frac{(0.05)^2 \times \left(\frac{220}{\sqrt{3}}\right)^2}{(1.75)^4\,[\,(0.1)^2 + (0.05)^2\ (0.9)^2\,]} = 8.36$$

$$n = n_s\,(1 - S) = 1500 \times 0.95 = 1425 \text{ r.p.m.}$$

P_2 Brake horsepower $P_m - 0.5 = 8.36 - 0.5$

$$= 7.86 \text{ HP}$$

(d) $n_{f1} = 1425$ r.p.m. , $\tfrac{1}{2}\, n_{f1} = 712.5$ r.p.m.

$$712.5 = 1500\,(1 - S_1)\ ,\ S_1 = 0.525$$

$$P_{m1} = P_m = 3 r_2' \frac{(1 - S_1)}{S_1} \times \frac{S_1^2 E_1^2}{r_2'^2 + S_1^2 X'^2_{20}}$$

$$8.36 \times 746 = \frac{3 \times 0.1 \times (1.75)^2 \times 0.475 \times 0.525 \times E_1^2}{(1.75)^4 [(0.1)^2 + (0.525)^2 (0.9)^2]}$$

$$8.36 \times 746 \times (1.75)^2 [0.01 + 0.223] = 0.1425 \times 0.525 \; E_1^2$$

$$\therefore \quad E^2_1 = \frac{8.36 \times 746 \times 3.06 \times 0.233}{0.145 \times 0.525} = 5.84 \times 10^4$$

$$E_1 = 242 \text{ V}$$

وهذه هي قيمة الضغط المرحلى وهى ضعف الضغط الاصلى تقريبا

$$E_{1L} = \sqrt{3} \times 242 = 418 \text{ V}$$

هذا ويمكن حل المسألة على النحو التالى:

$$P_m = T\omega \;, \quad P_{m1} = T_1 \; \omega_1 \;, \quad P_m = P_{m1}$$

$$\therefore \quad T\omega = T_1 \; \omega_1$$

$$T = K_t \frac{E^2 \propto S}{S^2 + \propto^2} \;, \quad T_1 = K_t \frac{E_1{}^2 \propto S_1}{S_1{}^2 + \propto_1{}^2}$$

$$\omega = \omega_s (1 - S) \;, \qquad \omega_1 = \omega_s (1 - S_1)$$

$$\therefore \quad K_t \; \omega_s \; (1 - S) \frac{E^2 \propto S}{S^2 + \propto^2} = K_t \; \omega_s \; (1 - S_1) \frac{E^2_1 \propto_1 S_1}{S_1{}^2 + \propto_1{}^2}$$

$$\propto_1 = \propto$$

$$\therefore \quad E_1^{\,2} = E^2 \frac{S\,(1 - S)\,(S_1^{\,2} + \alpha c^2)}{S_1\,(1 - S_1)\,(S^2 + \alpha c^2)}$$

$$= \left(\frac{220}{\sqrt{3}}\right)^2 \frac{0.05 \times 0.95\ (0.275 + 0.0121)}{0.525 \times 0.475\ (0.0025 + 0.0121)}$$

$$= 6.03 \times 10^4$$

$$E_1 = 246\ V$$

اختلفت النتيجة عمـا سبق اختلافا طفيفا بسبب التقريبات المختلفة فى القوانين المستنبطة.

(١١ ـ ١ الدائرة المكافئة المضبوطة للمحرك التأثيرى ثلاثى المراحل :

(The exact equivalent circuit of the 3 - phase Induction Motor)

نلاحظ أننا بينا نظريات المحرك التأثيرى ثلاثى المراحل كلها على أساس الدائرة المـــكافئة التقريبية المبينة فى شكل (٧ — ١) ، ومن ثم تكون الحسابات المترتبة على هذه النظريات والتى تعطى خواص تشغيل المحرك كلها تقريبية . وتختلف درجة التقريب على حسب حجم المحرك ومقـدار معامل الانزلاق s الذى تجرى عنده الحسابات ، بحيث يقل مقدار الخطأ الناشيء عن هذا التقريب كلما صغرت قيمة معـامل الانزلاق . لذلك فان هذه الدائرة المكافئة التقريبية تعطى نتائج يمكن قبولها والاعتماد عليها عندما يكون معامل الانزلاق فى حـدود قيمته عند الحمل الكامل تقريبا ، أما إذا زاد على ذلك (وخصوصا بالنسبة للحسابات الخاصة بقيمة النهاية العظمى لعزم الدوران) ، فانه يستحسن استخدام الدائرة المـكافئة الأصلية للمحرك ، كما سيرد تفصيله فى هذه الجزء .

ويجب أن نلفت النظر هنا فى هذا المجال إلى أن المعادلات من (١٧ — ١)

إلى (٢١ — ١) الخاصة بالقـــدرة وعــزم الدوران تعطى كلها علاقات صحيحة ينشأ التقريب فيها من ناحيتين : (أولا) عند اعتبار أن $E_1 \cong V_1$ ، وينتفى التقريب النــاشىء عن ذلك لو أمكن الحصول على E_1 واستخدامها فعلا بدلا من V_1 (ثانيا) أن E_1 ذات قيمة ثابتة ، وهو مايترتب على اعتبار أن الفيض المغناطيسي المتبادل ϕ_m ثابت قيمة عند كل الأحمال ، وهــذا غير صحيح ، وإلا وجب أن تتغير قيمة ضغط الينبوع V_1 نتيجة لتغير الحمــــل وبالتالى نتيجة لتغير هبوط الضغط فى كل من R_1 , X_1 بسبب تغير قيمة I_1 الناشىء عن تغير الحمل .

للحصول على علاقات مضبوطة نستخدم الدائرة المكافئة الأصلية للمحرك المبينة فى شكل (١٦ ـ ١) والمتطورة من شكل (١٢ ـ ٢) . فاذا رمزنا الى السماح Y_0 (admittance) الناتج عن دائرة المغطسة ، وباعتبار أن $(Z_1 = R_1 + jX_1)$ ، $Z'_{2s} = (\frac{R'_2}{s} + jX'_{20})$ نجـــد أن :

$$Y_o = \frac{1}{R_o} - j\frac{1}{X_0} \quad , \quad I_o = E_1 Y_o$$

$$I_{12} = I'_{2s} = \frac{E_1}{Z'_{2s}} \quad , \quad I_1 = I_{12} + I_o$$

$$\therefore \quad I_1 = E_1 \left(Y_o + \frac{1}{Z'_{2s}} \right) \qquad (١ - ٣١)$$

$$V_1 = E_1 + I_1 Z_1 = E_1 + E_1 Z_1 \left(Y_o + \frac{1}{Z'_{2s}} \right) = E_1 \left(1 + Z_1 Y_o + \frac{Z_1}{Z'_{2s}} \right)$$

(١ - ٣٢)

$$Z_1 Y_o = (R_1 + jX_1) \times \left(\frac{1}{R_o} - \frac{j}{X_o} \right)$$

$$Z_1\ Y_0 = \frac{R_1X_o - JR_1R_o + JX_1X_o + X_1R_o}{R_o\,X_o}$$

$$= \left(\frac{R_1}{R_o} + \frac{X_1}{X_o}\right) - j\left(\frac{R_1}{X_o} - \frac{X_1}{R_o}\right) \qquad (١-٣٣)$$

نظرا لأن كلا من $\frac{X_1}{R_o}$, $\frac{R_1}{X_o}$, $\frac{X_1}{X_o}$, $\frac{R_1}{R_o}$ أعداد كسرية صغيرة

جدا وذلك بسبب كبر كلا من R_0 , X_0 بالنسبة لكل من X_1 , R_1 فاننا نستطيع ان نهمل الجزء التخيلى فى قيمة $Z_1\ Y_0$ (حيث أنه يساوى الفرق بين كسرين صغيرين متقاربين فى القيمة) ونستطيع أن نعتبر هذه القيمة حقيقية مساوية لكسر صغير وهو عبارة عن $\left(\frac{R_1}{R_0} + \frac{X_1}{X_0}\right)$.

ويمكننا فى هذه الحالة أن نعتبر أن $(1+Z_1Y_0)$ عدد حقيقى ثابت اكبر قليلا من الواحد الصحيح ولنرمزله بالرمز k .

$$V_1 \cong E_1\left(k + \frac{Z_1}{Z'_{2s}}\right) \qquad (١-٣٤)$$

$$\therefore\ E_1 \cong \frac{V_1}{k + \frac{z_1}{z'_{2s}}} = V_1\frac{Z'_{2s}}{Z_1 + k\,Z'_{2s}}$$

$$E_1 \cong V_1\frac{\frac{R'_2}{s} + j\,X'_{20}}{(R_1 + jX_1) + k\left(\frac{R'_2}{s} + j\,X'_{20}\right)} \qquad (١-٣٥)$$

وتكون القيمة العددية لـ E_1 عبارة عن

$$E_1 \cong \sqrt{\frac{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + \left(X'_{20}\right)^2}{\left[R_1 + k\left(\frac{R'_2}{s}\right)\right]^2 + \left(X_1 + k X'_{20}\right)^2}} \times V_1 \quad (١-٣٦)$$

بالتعويض عن k بالقيمة المقربة $\left(1 + \frac{R_1}{R_0} + \frac{X_1}{X_0}\right)$ يمكننا الحصول على قيمة E_1 من المعادلة السابقة أقرب ماتكون إلى القيمة المضبوطة، ويمكن استخدام هذه القيمة فى معادلات عزم الدوران والقدرة للحصول على نتائج اكثر دقة من تلك التى حصلنا عليها باعتبار أن $V_1 \cong E_1$. هذا وعندما تصل سرعة العضو الدائر إلى سرعة التزامن (بمساعدته بعزم دوران فى نفس اتجاه دورانه) تصبح $s = o$ وتصبح قيمة Z'_{2s} تساوى مالانهاية ($\frac{R'_2}{S} = \infty$) بحيث تصبح قيمة $\frac{Z_1}{Z'_{2s}}$ فى المعادلة (٣٤ – ١) مساوية للصفر وتصبح $k \cong \frac{V_1}{E_1}$ ، وهذا يعنى أن قيمة k تساوي النسبة بين V_1 , E_1 عندما يدار المحرك بسرعة التزامن.

ومن ناحية أخرى ، فانه يمكن استخدام العلاقات السابقة للحصول على القدرة وعزم الدوران باستخدام V_1 بدلا من E_1 على النحو التالى:

$$I'_{2s} = \frac{E_1}{Z'_{2s}} = \frac{V_1}{Z_1 + k Z'_{2s}} = \frac{V_1}{(R_1 + JX_1) + k\left[\frac{R'_2}{S} + j X'_{20}\right]}$$

وتكون القيمة العددية لـ I'_{2s} هى:

$$I'_2 = \frac{V_1}{\sqrt{\left[R_1 + k\left(\frac{R'_2}{S}\right)\right]^2 + (X_1 + k X'_{20})^2}} \quad (١-٣٧)$$

$$= \frac{V_1}{\sqrt{\left[R_1 + \frac{R'_2}{S}\right]^2 + (X_1 + X'_{20})^2}} \quad (١-٣٨)$$

وهذه القيمة التقريبية التى تعطيها المعادلة (٣٨ ـ ١) لـ I'_{2s} هى نفس القيمة التى حصلنا عليها سابقا باستخدام الدائرة المكافئة التقريبية شكل (١ ـ ١) التى اعتبرت فيها R_0 و X_0 موصلتين على الينبوع مباشرة . والمعادلة (٣٧ ـ ١) هى الأخرى تقريبية باعتبار $k = \left(1 + \frac{X_1}{X_0} + \frac{R_1}{R_0}\right)$ ويقل مقدار التقريب فيها كلما اقتربت قيمة S من الصفر.

يمكننا الآن الحصول على عزم الدوران والقدرة بأشكالها المختلفة ، كما سبق أن حصلنا عليها في البداية فى المعادلات من (٨ ـــ ١) إلى (١٧ ـ ١) ، ولكن بدلالة V_1 ضغط الينبوع هذه المرة ، وهو ثابت القيمة فعلا ، بدلا من E_1 التي اعتبرناها ثابتة القيمة فى المعادلات المذكورة .

$$T = \frac{P_g}{9.81 \times 2\pi \frac{n_s}{60}} = 0.975 \frac{3 \; I'^2_{2s}}{n_s} \times \frac{R'_2}{S}$$

وبالتعويض عن I'_{2s} بما يساويه بدلالة V_1 من المعادلة (٣٧ ـ ١) نجد أن

$$T = \frac{2.925\, V_1^2}{n_s} \frac{\left(\frac{R_2'}{S}\right)}{\left[R_1 + k\left(\frac{R'_2}{S}\right)\right]^2 + \left[X_1 + k\, X'_{20}\right]^2}$$

(٣٩ — ١)

$$P_g = 3\, I'^2_{2s} \frac{R'_2}{S} = 3\, I^2_{2s} \frac{R_2}{S}$$

$$= 3\, V_1^2 \frac{\left(\frac{R'_2}{S}\right)}{\left[R_1 + k\left(\frac{R'_2}{S}\right)\right]^2 + \left[X_1 + k\, X'_{20}\right]^2} \quad (١ - ٤٠)$$

$$P_m = (1 - S)\, P_g \quad , \quad P_{cu_2} = S\, P_g \quad (١ - ٤١)$$

يكون منحنى عزم الدوران مع الانزلاق ، مشابها لمثيله عند اعتبار E_1 ثابتة القيمة ، ويمكن رسمه باستخدام المعادلة (٣٩ — ١) ونحصل على قيمة معامل الانزلاق الذى تقع عنده قيمة النهاية العظمى لعزم الدوران ، كما فعلنا في المرة السابقة بمساواة $\frac{dT}{dS}$ بالصفر حيث نجد أن

$$S_m = \pm \frac{kR'_2}{\sqrt{[R_1^2 + (X_1 + k\; X'_{20})^2]}} \quad (١ - ٤٢)$$

$$= \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_{20})^2}} \quad (١ - ٤٣)$$

وبتعويض هذه القيمة للانزلاق S_m فى المعادلة (٣٩ — ١) نحصل على قيمة النهاية العظمى لعزم الدوران T_m ، فنجد أن:

$$T_m = \frac{1.462\ V_1^2}{kns} \frac{1}{R_1 + \sqrt{[R_1^2 + (X_1 + k\ X'_{20})^2]}}$$

(٤٤ - ١)

ونلاحظ من هذه المعادلة أن قيمة النهاية العظمى لعزم الدوران لا تتوقف على مقاومة ملفات العضو الدائر R_2 ولكنها تتوقف على X'_{20} و R_1 و X_1 حيث تقل بالزيادة فى قيمة أى من هؤلاء الثلاثة . كما أنها تتأثر أيضاً بقيمه X_0 الداخلة فى تحديد قيمة المقدار k فتزداد بزيادة X_0 . للحصول على قيمة النهايه العظمي لعزم الدوران عند البدء نضع $S_m = 1$ فى المعادلة (٤٢— ١) ونضيف إلي R'_2 مقاومة البدء R_{st} التي تستخدم لتنفيذ الشرط المطلوب ، فنجد أن :

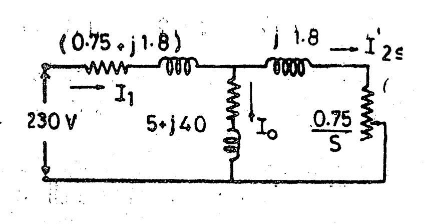
$$R'_2 + R_{st} = \frac{[R_1^2 + (X_1 + k\ X'_{20})^2]^{\frac{1}{2}}}{k}$$

وتكون قيمة مقاومة البدء R_{st} اللازم اضافتها إلي كل مرحلة من مراحل العضو الدائر للحصول على T_m عند البدء عبارة عن

$$R_{st} = \frac{[R_1^2 + (X_1 + k\ X'_{20})^2]^{\frac{1}{2}} - k\ R'_2}{k} \qquad (٤٥ - ١)$$

مثال محلول :

The equivalent circuit of one phase of a star—connected, 3 - phase, 50 HZ, 4 pole slip-ring induction motor is given. Allowing 1% of the input for mechanical losses, calculate the line current, powerfactor and horse power of the motor at a slip of 4%



(شكل ١٦-١)

أعطيت فى المسألة المعاوقة الكلية المكافئة للفرعين المتوازيين X_0 و R_0 ، وهى ($\frac{1}{Y_0} = Z_0 = 5 + j\ 40$). وسوف نقوم فى هذه الحالة بحل دائرة المحرك المكافئة المعطاة باستخدام قوانين الدوائر مباشرة، ودون الرجوع إلى القوانين المستنبطة (على أساس قوانين الدوائر أيضا ولكن باستعمال Y_0) .
فاذا كانت المعاوقة المرحلية الكلية لدائرة المحرك على الينبوع هى Z_t نجد أن

$$Z_t = 0.75 + j\ 1.8 + \frac{(5 + J\ 40)\left(\frac{0.75}{0.04} + J\ 1.8\right)}{\left(5 + \frac{0.75}{0.04}\right) + J\ (40 + 1.8)}$$

$$= 0.75 + j\ 1.8 + 13.94 + j\ 7.4$$

$$= 14.69 + j\ 9.2 = 17.33 \ \underline{|\ 32^0\ 3'}$$

ويكون تيار المدخل المرحلي للمحرك I_1 عبارة عن :

$$I_1 = \frac{V}{Z_t} = \frac{230}{17.33\ \underline{|\ 32^0\ 3'}} = 13.3\ \underline{|\ -32^0\ 3'}$$

معامل القدرة : power factor $\cos\phi = \cos 32^0\ 3' = 0.8485$

وتكون قدرة المدخل للمحرك عبارة عن $3V\ I_1\ \cos\phi$:

$$3\ V\ I_1\ \cos\phi = 3 \times 230 \times 13.3 \times 0.8485 = 7800\ W$$

المفقودات الميكانيكية : $P = 0.01 \times 7800 = 73\ W$

نحصل على تيار العضو الدائر من التيار I_1 على النحو التالى :

$$I'_{2s} = I_1 \frac{Z_0}{Z'_{2s} + Z_0} = 13.3 \;\underline{|-32.°3'} \times \frac{5 + J\,40}{23.75 + j\,41.8}$$

وتكون القيمة العددية لـ I'_{2s} عبارة عن :

$$I'_{2s} = 13.3 \times \frac{40.31}{48.07} = 11.15 \text{ amps}$$

وتكون قدرة الثغرة الهوائية P_g عبارة عن :

$$P_g = 3\,(I'_{2s})^2\,\frac{R'_2}{s} = 3 \times (11.15)^2 \times \frac{0.75}{0.04} = 6980\ W$$

ونحصل على القدرة الميكانيكية P_m على النحو التالى :

$$P_m = P_g\,(1 - S) = 6980 \times 0.96 = 6700\ W$$

وتكون قدرة المخرج P_2 عبارة عن :

$$P_2 = P_m - P_f = 6700 - 78 = 6622\ W = 8.89\ HP$$

(١٢-١) تشغيل المحركات التأثيرية ثلاثية المراحل على ينبوع غير متزن الضغط :

(Operation of Induction Motors on unbalanced volt supply)

يتم حل المسائل التي تحتوى على ضغوط أو تيارات غير متزنة عادة باستخدام نظرية المركبات المتماثلة (Theory of symmetrical Components) التي يمكن بوساطتها تحليل أية مجموعة ثلاثية (أو ثنائية) من الضغوط أو التيارات

غير المتماثلة (unsymmetrical) إلى مجموعتين أو ثلاث من الضغوط أو التيارات المتماثلة يطلق عليها اسم المركبات المتماثلة (Symmterical Components) . ويكون لهذه المركبات المتماثلة مجمعة نفس التأثير والنتائج التي تعطيها المجموعة الأصليه من الضغوط أو التيارات غير المتماثلة ، ولكنها تمتاز عنها بأنه يمكن استخدام النظريات المعروفة مع كل منها على حدة باعتبارها مجموعة متماثلة تخضع لتطويع هذه النظريات . ويمكن بعد ذلك تجميع نتائج المركبات المتماثلة فى الاتجاه المضاد للحصول على المجموعة غير المتزنة الناشئة عن استخدام المجموعة غير المتزنه الأصلية .

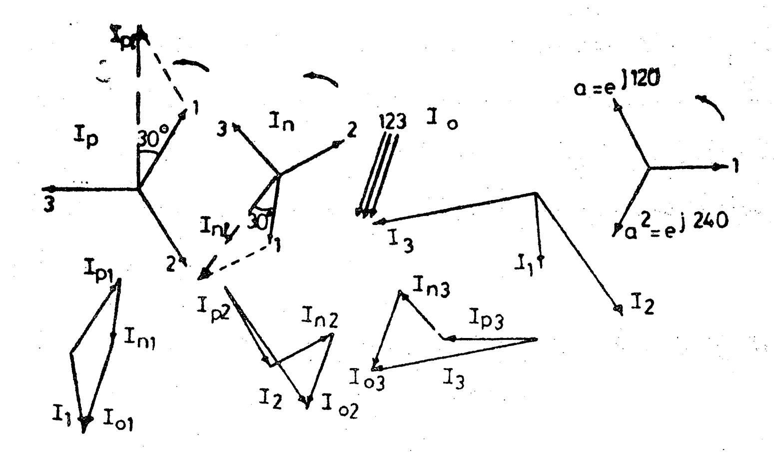
تتكون المركبات المتماثلة لمجموعة غير متزنة من ثلاث مجموعات على النحو التالى : (بالنسبة لمجموعات التيار على سبيل المثال) :

١ — مجموعة التعاقب المرحلي الموجب : (The positive phase sequence system) وهى تتكون من ثلاثة مرتحلات * (phasors) متساوية I_{p3} ، I_{p2} ، I_{p1} ذات تعاقب مرحلي ١ — ٢ — ٣ فى الاتجاه الموجب مثل أى مجموعة متزنة للضغط أو التيار (شكل ١٧ – ١) .

٢ — مجموعة التعاقب المرحلي السالب : (The negative phase sequence system) وهى تتكون من ثلاث مرتحلات متساوية I_{n_3} و I_{n_2} و I_{n_1} ذات تعاقب مرحلى ١ — ٣ — ٢ في الاتجاه الموجب ، أو نفس التعاقب المرحلى السابق ١ — ٢ — ٣ فى الاتجاه السالب (شكل ١٧ – ١)

---

* استخدمت كلمة مرتحل (phasor) هنا للدلالة على الضغط أو التيار عندما يتغير لحظيا مع الزمن على منحنى جيبى ، وذلك بدلا من كلمة متجه (Vector) التي كانت تستخدم سابقا ، لان أى من الضغط أو التيار ليس فى الحقيقة كمية موجهة مثل القوة مثلا ، وإن أمكن تمثيل كل منهما بطول محدد الاتجاه .



شكل (١٧ ـ ١)

٣ ـــ مجموعة التعاقب المرحلى الصفرى (Zero phase sequence system
وهى تتكون من ثلاث مرتحلات متساوية I_{03} و I_{02} و I_{01} متفقة مرحلياً أى أن الاختلاف المرحلى بينها يساوى صفر .

فاذا كانت المجموعةاغيرالمتزنهمكونةمن المرتحلات الثلاثة I_3 و I_2 و I_1 ، وهى غير متساوية في القيمة ، والاختلاف المرحلى بين كل اثنين منها يختلف عن ١٢٠ درجه (المجموعة المتزنة ذات قيم متساوية ، والاختلاف المرحلى بين كل اثنين منها يساوى ١٢٠ درجة)فان كل مرتحل من هذه المرتحلات الثلاث يساوى مجموع المرتحلات المناظرة فى المركبات المتماثلة أى أن :

$$
\begin{aligned}
I_1 &= Ip_1 + I_{n1} + I_{01} \\
I_2 &= Ip_2 + I_{n2} + I_{02} \\
I_3 &= Ip_3 + I_{n3} + I_{03}
\end{aligned}
\qquad \cdots \quad (١ — ٤٦)
$$

يبين شكل (١٧ - ١) كيف تتحقق صحة المعادلات (٤٦ - ١) بالرسم . فاذا كانت 1 ، a ، a^2 تكون مجموعة مرتحلات ثلاثيه متزنة طول كل منها الوحدة وبين كل اثنين منها اختلاف مرحلى ١٢٠ درجة كما هو مبين فى شكل (٤٦ - ١) ، فان هذا يعنى أن ضرب أى مرتحل في a يكافىء ادارة هـــذا المرتحل ١٢٠ درجة في الاتجاه الموجب (عكس اتجاه عقربى الساعة) ، وضرب المرتحل فى a^2 يكافىء إدارته ٢٤٠ درجة فى الاتجاه الموجب أو ١٢٠ درجة فى الاتجاه السالب (اتجاه عقربى الساعة) ، وفي هذه الحالة نجد أن:

$$\left.\begin{aligned} a &= e^{j\,120} = (-0.5 + 0.866\,j) \\ a^2 &= e^{j\,240} = (-0.5 - 0.866\,j) \\ a^3 &= e^{j\,360} = 1 \\ a^4 &= a \times a^3 = a \\ 1 + a + a^2 &= 0 \end{aligned}\right| \quad \text{(١-٤٧)}$$

حيث a^2 , a , 1 هى الجذور التكعيبية الثلاثة للواحد الصحيح . فاذا كان I_p هو طول كل من مرتحلات مجموعة التعاقب المرحلى الموجب , I_n هو طول كل من مرتحلات مجموعة التعاقب المرحلى السالب, I_0 هو طول كل من مرتحلات مجموعة التعاقب المرحلى الصفري ، نجد أن :

$$\left.\begin{aligned} I_{p1} &= I_p & I_{n1} &= I_n & I_{01} &= I_0 \\ I_{p2} &= a^2\, I_p & I_{n2} &= a\, I_n & I_{02} &= I_0 \\ I_{p3} &= a\, I_p & I_{n3} &= a^2\, I_n & I_{03} &= I_0 \end{aligned}\right| \quad \text{(١-٤٨)}$$

وبالتعويض من (٤٨ ـ ١) في (٤٦ ـ ١) نحصل على المجموعة غير المتزنة I_3 و I_2 و I_1 بدلا كل من I_p ، I_n ، I_0 فقط على النحو التالي :

$$\begin{aligned} I_1 &= I_p + I_n + I_0 \\ I_2 &= a^2 I_p + a I_n + I_0 \\ I_3 &= a I_p + a^2 I_n + I_0 \end{aligned} \qquad \dots \dots (٤٩ - ١)$$

وبجمع هذه المعادلات الثلاثه نحصل على I_0 بدلالة I_3 ، I_2 ، I_1 حيث أن:

$$I_1 + I_2 + I_3 + = 3 I_0 \rightarrow I_0 = \frac{1}{3} \left(I_1 + I_2 + I_3 \right)$$

... (٥٠ - ١) ...

وبجمع المعادلات (٤٩ ـ ١) مرتين بعد ضرب I_2 فى a ، I_3 فى a^2، ثم ضرب I_2 فى a^2، و I_3 فى a نجد أن :

$$\begin{aligned} I_1 &= I_p + I_n + I_0 \\ a I_2 &= I_p + a^2 I_n + a I_0 \\ a^2 I_3 &= I_p + a I_n + a^2 I_0 \end{aligned}$$

$$I_1 + a I_2 + a^2 I_3 = 3 I_p \rightarrow I_p = \frac{1}{3} \left(I_1 + a I_2 + a^2 I_3 \right)$$

... (٥١ - ١) ...

$$\begin{aligned} I_1 &= I_p + I_n + I_0 \\ a^2 I_2 &= a I_p + I_n + a^2 I_0 \\ a I_3 &= a^2 I_p + I_n + a I_0 \end{aligned}$$

$$I_1 + a^2 I_2 + a I_3 = 3 I_n$$

$$I_n = \frac{1}{3} \left(I_1 + a^2 I_2 + a I_3 \right) \cdots \cdots \quad (١-٥٢)$$

بذلك نجـــد أن المعادلات (٤٩-١) تعطى المجموعة غير المتزنة بدلالة المركبات المتماثلة ، بينما تعطى المعادلات (٥٠-١) ، (٥١-١) ، (٥٢-١) المركبات المتماثلة بدلالة المجموعة غير المتزنة . هذا وإذا كانت المجموعة I_3 و I_2 و I_1 متزنة نجد أن :

$$I_2 = a^2 I_1 \quad , \quad I_3 = a I_1 \qquad \cdots (١-٥٣)$$

وبالتعويض من (٥٣-١) في المعادلات (٥٠-١) ، (٥١-١) ، (٥٢-١) نحصل على المركبات المتماثلة للمجموعة المتزنة وهي :

$$I_0 = \frac{1}{3} (I_1 + a^2 I_1 + a I_1) = \frac{1}{3} I_1 (a^2 + a + 1) = 0$$

$$I_n = \frac{1}{3} (I_1 + a I_1 + a^2 I_1) = \frac{1}{3} I_1 (1 + a + a^2) = 0$$

$$I_p = \frac{1}{3} (I_1 + I_1 + I_1) = I_1$$

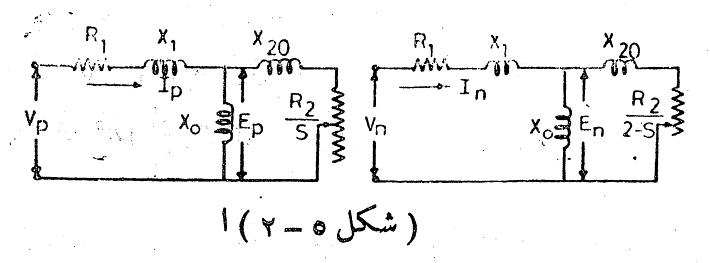
وهذا يعنى أن أية مجموعة متزنة هي في الواقع عبارة عن مجموعة تعاقب مرحلى موجب . فاذا كانت المجموعة غير متزنة فقد يدخل في تركيبها مع مجموعة التعاقب المرحلى الموجب كل من مجموعتي التعاقب المرحلى السالب والتعاقب المرحلى الصفرى أو أى منهما . وعندما تكون المجموعة موصلة نجمة ، وتكون نقطة النجمـــة فيها معزولة بدون أي اتصال ، فان مجموع التيارات الداخلة والخارجة من هذه النقطة، على حسب قانون كيرشوف يساوى صفراً ، ومن ثم فان مجموع I_3 و I_2 و I_1 يساوى صفرا ، مما يعنى أن أن I_0 يساوى صفرا ، وعدم وجود مجموعة تيارات صفرية في هذه الحالة.

أما اذا كانت المجموعةموصلة دلتا فان مجموعة التيارات الصفرية لا يمكن أن تتواجد فى تيارات الخطوط ، ولـكن يمكن أن تتواجد مجموعة تيارات صفرية كمركبة لمجموعة التيارات المرحلية ، حيث تجد مسارا لها فى الدلتـا المقفلة ويكون تيار القصر المار فى الدلتا الناشىء عن توافقيات الضغط من الدرجة الثالثة ومضاعفاتها فى ملفات مولدات التيار المتردد مجموعة صفرية ذات تردد ثلاثة أضعاف التردد الأساسى (راجع كـتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية صفحة ٧٧):

وبالنسبة لمجموعات الضغوط ، فانه يمكن تحليلها على نفس النمط سـواء كانت مجموعة ضغوط مرحلية أو مجموعة ضغوط خطية . وتجب ملاحظة أن المركبة الصفرية لا يمكن أن تتواجد في مجموعة ضغوط خطيـة ، لأن مجموعها يساوى صفراً دائما.

عند تغذية المحرك التأثيرى ثلاثى المراحل بمجموعة من الضغوط غير المتزنة فاننا نستطيع تحليل هذه الضغوط إلي مركباتها المتماثلة ، ثم نطبق على كل من هذه المركبات على حدة ما سبق أن استخدمناه مع مجموعة الضغوط المتزنة ، لـكى نحصل على خواص تشغيل المحرك بفعل هذه المركبة بالذات، وتكون خواص التشغيل الفعلية للمحرك هى عبـارة عن خواص المركبات المتماثلة مجتمعة على أساس نظرية التجميع (Superposition) . ويمكن الحصول من المعلومات المعطاة عادة على مجموعتى التعاقب الموجب والسالب ، أما مجموعة التعاقب الصفرى فانها تكون غير محددة ، ولـكن نظراً أنه لا يمكن تواجد مجموعة تيارات صفرية على أى الأحوال ، فانه يمكن تجاهل وجود مجموعة التعاقب الصفرى للضغط ، واستنباط خواص تشغيل المحرك على أساس مجموعتى التعاقب الموجب والسالب للضغط فقط . وفى هذه الحالة فان مجموعة التعاقب الموجب تؤدى إلى إنشاء مجال مغناطيسي أمامي ، له نفس خواص

وتأثير المجال المغناطيسي الدائر في حالة مجموعة الضغوط المتزنه ، وتكون للمحرك نفس الدائرة المكافئه بمعامل الانزلاق S ، كما هو مبين في شكل (٥ — ٢) ا . أما مجموعة التعاقب السالب فانها تعمل على إنشاء مجال مغناطيسى يدور فى عكس اتجاه دوران العضو الدائر ، وهو مجال خلفى مماثل للمجال الخلفى في المحرك احادى المرحلة ، حيث يكون معامل الانزلاق الخاص به هو (2 - S) . وتكون الدائرة المكافئة للمحرك مع مجموعة التعاقب السالب مماثلة للدائرة المكافئة مع مجموعة التعاقب الموجب مع استخدام معامل الانزلاق (2 — S) بدلا من S ، كما هو مبين فى شكل (٢٥ — ٢) ا مع اهمال R_0 فى هذه الحالة واعتبار مفقودات الحديد جزء من المفقودات الميكانيكية .



(شكل ٥ — ٢) ا

فاذا كانت مجموعة الضغوط المرحلية غير المتزنة هى V_3 و V_2 و V_1 نجد أن :

$$V_p = \frac{1}{3}(V_1 + a\,V_2 + a^2\,V_3)$$

$$V_n = \frac{1}{3}(V_1 + a^2\,V_2 + a\,V_3) \qquad \ldots \quad (١٢ — ٢)$$

وتكون V_p هى الضغط المرحلى لمجموعة التعاقب الموجب ، V_n الضغط المرحلي لمجموعة التعاقب السالب ، كما يكون I_p هو تيار التعاقب المرحلى الموجب ، I_n هو تيار التعاقب المرحلى السالب.

هذا ، وفى كثير من الأحيان تعطى الضغوط الخطية للمجموعة غير المتزنة وهى.

$$V_{12} = V_1 - V_2 \; , \; V_{23} = V_2 - V_3 \; , \; V_{31} = V_3 - V_1$$

وفي هذه الحالة نحصل أولا على الضغوط الخطية لمجموعة التعاقب الموجب وكذلك الضغوط الخطية لمجموعة التعاقب السالب على النحو السابق ، حيث نجد أن:

$$\left.\begin{aligned} V_{pl} &= V_{p12} = \frac{1}{3}\,(V_{12} + a\,V_{23} + a^2\,V_{31}) \\ V_{nl} &= V_{n12} = \frac{1}{3}\,(V_{12} + a^2\,V_{23} + a\,V_{23}) \end{aligned}\right| \quad (١٣-٢)$$

وتكون العلاقة بين V_p و V_{pl} هى نفس العلاقة بين القيمـــة المرحلية والقيمه الخطية فى المجموعه المتزنة ذات التعاقب المرحلى الموجب ، أى أن

$V_p = \frac{1}{\sqrt{3}} V_{pl}$ وهى متأخرة عن V_{pl} مرحليا بمقدار ٣٠ درجة ،

كما أن $V_n = \frac{1}{\sqrt{3}} V_{nl}$ وهى متقدمة عن V_{nl} مرحليا بمقدار ٣٠ درجة ،

وهذا كله واضح فى شكل (١٧ — ١). بذلك يمكننا الحصول على كل من V_{pl} ، V_{nl} من الضغوط الخطية غير المتزنة من المعادلة (١٣ — ٢) ، ثم

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{3}}\,V_{pl}\,\angle{-30^\circ} \quad , \quad V_n = \frac{1}{\sqrt{3}}\,V_{nl}\,\angle{30^\circ} \qquad (١٢-٣)$$

مثال محلول :

Each phase of the rotor of a 3 - phase induction motor has a rsistance of 1 ohm and standstill reactance of 4 ohms, when

running from a symmetrical 3 phase 400 Volt supply at 5% slip, the torque determined is 20 ft-lb. Calculate the torque when running with the same speed having the following Voltages to neutral :

$$V_1 = 240 \underline{|0} \quad , \quad V_2 = 183 \underline{|229^\circ} \quad , \quad V_3 = 183 \underline{|131^\circ}$$

$$V_1 = 240$$

$$V_2 = 183 (- 0.655 - j\ 0.755) = - 120 - j\ 138$$

$$V_3 = 183 (- 0.655 + j\ 0.755) = - 120 + j\ 138$$

$$a = (- 0.5 + j\ 0.866) \quad , \quad a^2 = (- 0.5 - j\ 0.866)$$

$$V_p = \frac{1}{3} \Big[240 + (- 0.5 + j\ 0.866) (- 120 - j\ 138) + (- 0.5 - j\ 0.866) (- 120 + j\ 138) \Big]$$

$$\simeq 199.7 \ \text{V}$$

$$V_n = \frac{1}{3} \Big[240 + (- 0.5 - j\ 0.366) (- 120 - j\ 138) + (- 0.5 + j\ 0.866) (- 120 + j\ 138) \Big]$$

$$\simeq 40.33 \ \text{V}$$

$$I_p = \frac{V_n}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{S}\right)^2 + x_{20}^2}} = \frac{199.3}{\sqrt{\left(\frac{1}{0.05}\right)^2 + 4^2}} = 9.8 \text{ A}$$

$$I_n = \frac{V_n}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{2 - s}\right)^2 + x_{20}^2}} = \frac{40.33}{\sqrt{\left(\frac{1}{2 - 0.05}\right)^2 + 4^2}} = 10\text{A}$$

وذلك على أساس اهمال هبوط الضغط فى معاوقة العضو الثابت بالنسبة لكل من مجموعتى التعاقب ، واستخدام العلاقات المقربة ، وذلك بسبب عدم معرفة قيمة X_0 , X_1 , R_1 ، وإلا فقد كان يمكننا استخدام العلاقات الخاصة بالدائرة المكافئة المضبوطة . يمكننا أن نضع معادلةعزم الدوران بالشكل الآتى.

$$T \alpha \frac{I_2^2 R_2}{S} = K \frac{I^2{}_2}{S}$$

وعند استخدام الضغوط الخطية المتزنة ٤٠٠ فولت نجد أن :

$$I_2 = \frac{400/\sqrt{3}}{\sqrt{\left(\frac{1}{00.5}\right)^2 + 4^2}} = \frac{400/\sqrt{3}}{\sqrt{416}}$$

$$20 = K \frac{I^2{}_2}{S} = K \frac{(400)^2}{416 \times 3 \times 0.05}$$

$$K = \frac{0.05 \times 20 \times 3 \times 416}{160000} = 78 \times 10^{-4}$$

ونحصل على عزم الدوران فى حالة الضغوط غير المتزنة من فرق عزمى الدوران الناشئين عن المجالين الأمامى والخلفى تحصل عليه فى حالة المحرك احادى المرحلة ، وذلك على النحو التالى :

$$T = T_f - T_b = K \left[\frac{I^2p \ R_2}{s} - \frac{I^2{}_n \ R_2}{(2 - s)} \right]$$

$$= 78 \times 10^{-4} \left[\frac{(9.8)^2 \times 1}{0.05} - \frac{(10)^2 \times 1}{1.95} \right]$$

$$= 14.85 \text{ lb. ft}$$

الباب الثاني

تشغيل المحركات التأثيرية ثلاثية مراحل

Operation of three – phase Induction Motors

تشتمل دراسة تشغيل المحركات التأثيرية ثلاثية المراحل على ثلاثة موضوعات رئيسية هى ، على التوالى، طرق بدء دوران المحرك (methods of starting) وطرق تغيير سرعة المحرك (methods of speed control) وطرق تغيير معامل القدرة للمحرك (methods of varying the power factor) . وتتم دراسة الموضوعين الأخيرين عادة في إطار واحد ، حيث نجد أن تغيير السرعة يكون مصحوبا ببعض التأثير على معامل القدرة في أحيان كثيرة ، كما أن تغيير معامل القدرة قد لا يتأتى إلا بالتأثير على السرعة في أحيان أخرى. لذلك نرى أنه من الأنسب أن نقسم دراسة تشغيل المحركات التأثيرية ثلاثية المراحل إلى قسمين أساسيين هما بدء دوران المحرك ، ثم تغيير سرعة المحرك والتحكم فى معامل قدرته ، كما سوف يرد فيما يلى .

أولا ـ طرق البدء فى المحركات التأثيرية ثلاثية المراحل

(Starting of 3—phase Induction Motors)

يتبين لنا من مراجعة المعادلة (٢٩ ـ ١) في الباب الأول أن قيمة تيار البدء المرحلى الذى يسحبه المحرك ، عند توصيله إلى الينبوع توصيلا مباشرا ، لحظة بدء دورانه ، تتناسب طرديا مع الضغط المرحلى للينبوع ، وعكسيا مع المعاوقة المرحلية الكلية المكافئة لدائرة المحرك منسوبة إلى الجانب الابتدائى . ويطلق على التيار الذي ينشأ عن استخدام التوصيل المباشر (Direct Switching)

اسم تيار دائرة القصر (Short circuit current) للمحرك ، ويكون هو نفسه عبارة عن تيار البدء في هذه الحالة ، كما تساوى قيمته عـدة مرات قيمة تيار الحمل الكامل للمحرك . ويعتبر المحرك في حالة دائرة قصر عند البدء ، على هذا المنوال ، لأن قيمة المقاومة التى تتبدد فيها القدرة المكافئة للحمل الميكانيكى، وهى $\left(\frac{1-s}{s}\right) R'_2$ تساوى صفرا ، لأن s تساوى الواحد الصحيح .

ومن ناحية أخرى فان عـزم دوران المحـرك عند البدء T_{st} ، باستخدام طريقة التوصيل المباشر ، تتوقف على قيمة تيار البدء I_{st} المشار إليها سابقا ، وعلى قيمة المقاومة المرحلية للعضو الدائر R'_2 (كل القيم منسوبة إلى الجانب الابتدائى ناحية الينبوع) . وبالرجوع إلى المعادلات (١٢-١) ، (١٤-١) ، (١٦ - ١) وتطبيقها في حالتى البدء والحمل الكامل نجـد أن (T_{st} و T_{fl} ، I_{st} و I_{fl}) :

$$T_{st} = \frac{P_{g\ st}}{2\pi \frac{n_s}{60}} = \frac{3}{2\pi \frac{n_s}{60}} I^2_{st} \frac{R'_2}{1} = k_t I^2_{st} R'_2$$

$$T_{fl} = \frac{P_{g\ fl}}{2\pi \frac{n_s}{60}} = \frac{3}{2\pi \frac{n_s}{60}} I^2_{fl} \frac{R'_2}{S_{fe}} = R_t I^2_{fl} \frac{R'_2}{S_{fe}}$$

$$\therefore T_{st} = T_{fl} \left(\frac{I_{st}}{I_{fe}}\right)^2 S_{fl} \qquad (١ — ٢)$$

وهذا يعنى أنه إذا كان التوصيل المباشر للمحرك على الينبوع يعطى تيار بدء تتراوح قيمته بين ثلاث وخمس مرات قيمة تيار الحمـل الكامل ، فان عزم دوران البدء الذى نحصل عليه من المحرك في هـذه الحالة تتراوح قيمته ما بين ثلاثون وثمانون في المائة من عزم دوران الحمل الكامل ، باعتبار أن

معامل الانزلاق عند الحمل الكامل يزيد قليلا على ثلاثة فى المائة ، وهو متوسط القيم المعتادة . وإلى جانب ذلك فان أى اتجاه نحــو تقليل قيمة تيار البدء مع استمرار استخدام طريقة التوصيل المباشر (كتقليل ضغط الينبوع V_1 مثلا) سوف يؤدى إلى هبوط ملحوظ في قيمة عزم دوران البدء للمحرك بالنسبة إلى عزم دورانه عند الحمل الكامل ، وهو أمر غير مرغوب فيه فى معظم الأحيان.

يتعين علينا أن نناقش فى هذه المرحلة عيوب تيار البدء الكبير الناشىء عن التوصيل المباشر . إذا كان المحرك كبيرا نسبيا (مقنن قدرته بضع عشرات من من الأحصنه) ، فان الأجزاء الدوارة فيه (وخصوصا إذا كان الحمل مرتبط بعمود الادارة من قبل البدء) تحتاج إلى وقت ملحوظ(بضع عشرات من الثوانى على الأقل) حتى تصل إلى قرب السرعة المعتادة . وهذا يعنى أن تيار البدء الكبير سوف ينتج كميات كبيرة من الحرارة في ملفات العضو الدائر قبل أن تهبط قيمته إلي المستوى الذى يعطي حرارة يمكن لهذه الملفات تبديدها دون أن يلحق بها عطب ، نتيجة للارتفاع الزائد فى درجــة حرارتها . أما إذا كان المحرك صغيرا نسبيا (مقنن قدرته لا يزيد عن بضعة أحصنه على أكثر تقدير) ، فان الأجزاء الدوارة فيه (وخصوصا إذا كان البدء بدون حمـل) تدرك السرعة المعتادة فى وقت لا يتيسر لتيار البدء أن يولد فيه كمية من الحرارة ، يمكن أن ترفع درجــة حرارة ملفات العضو الدائر بصورة خطيرة . ولكننا نجد أن تيار البدء الكبير ، الذى يصل إلى المحرك فى جميع الأحوال عن طريق خط توزيع قدرة رئيسى ، قد يسبب قلقا للمشرفين على صيانة هذا الخط ، بمـا يسببه هذا التيار الكبير (مع أمثاله من التيارات المحتملة التى تسحبها محركات مماثلة تتغذى من نفس الخط) من هبوط فى الضغط وتسخين زائد فى الخط . لذلك نجد أنه حتى عندما يكون المحرك قادرا على استيعاب تيار البدء الكبير ، بدون خوف على ملفات عضوه الدائر ، فاننا نكون ملزمين بالحد من قيمة تيار البدء الذى يسحبه المحرك من الخط ، باعتبار بنود الاتفاق المبرم بيننا وبين أصحاب هذا الخط .

أما فى الحالات التى تتولد فيها كميات من الحرارة ، يخشي من تراكمها على العضو الدائر الناشئة فيه ، فان هذا يعنينا فى المقام الأول بالنسبة للمحركات ذات القفص السنجابى ، حيث أننا فى حالة المحركات ذات الحلقات الانزلاقية نستخدم مقاومات خارجية ، موصلة إلى ملفات العضو الدائر ، للحد من قيمة تيار البدء ، فتكون مقاومات البدء هذه هي المسئولةعن تبديد الجزء الاكبر من كميات الحرارة الزائدة المتولدة فى خلال عملية البدء . وتزداد كميات الحرارة، التى ترفع من درجة حرارة القفص السنجابى ، بصورة مزعجة فى خلال فترة بدء المحرك، إذا كانعمود إدارة المحرك مرتبطا بالحمل (motor Shaft coupled to load) منذ البداية ، وكان الحمل يمتلك عزم قصور ذاتى كبير . وفى هذه الحالة قد تؤدى الاجهادات الناشئة عن استطالة قضبان القفص السنجابى بتأثير الحرارة إلى تلفه (damaged) . لذلك يجدر بنا ، فى هذه المرحلة ، أن نبحث عن العلاقة بين كميات الحرارة المتولدة فى خلال فترة بدء المحرك ذى القفص السنجابى ، وبين مقدار عزم القصور الذاتى للكتل الموجودة على عمود إدارته فى هـذه الفترة ، وغير ذلك من العوامل الأخرى التى لابد وأن تكون ذات تأثير حيوى فى هـذا المجال ، مثل قدرة المحرك وثابت الزمن الميكانيكى له (mechanical time Coustnnt) (للتعرف على هـذا الثابت راجع كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية للمؤلف ص ١٦٨ ، ٢٦٩) .

يرتبط عزم الدوران T (كيلو جرام متر (Kg.m)) بعزم القصور الذاتى للكتل الموجودة على عمود الإدارة J (كيلو جرام / متر ثانية^2) ($Kg/m\ Sec^2$)، مع السرعة الزاوية ω (زاويه نصف قطرية / ثانية) (radian/Sec) عند لحظة t (ثانية)(.Sec) بالمعادلة المعروفة :

$$T = J \frac{d\omega}{dt} \qquad (٢ — ٢)$$

ويكون مقدار القدرة المنقولة عبر الثغرة الهوائية P_g ، التى تغذى دائرة

العضو الدائر ، بالوات عبارة عن $P_g = T\omega_0$ ، حيث ω_0 هى سرعة التزامن الزاوية للمحرك . و تستنفذ هـذه القدرة فى تعجيل عمود إدارة المحرك عند السرعـة ω بالجزء P_a ، وفى مفقودات العضو الدائر الكهربية بالجزء L_2 ، الذى يتبدد فى شكل حرارى . وعندما تكون سرعة العضو الدائر ω ، فان طاقة حركته W_k تساوى $\frac{1}{2} J \omega^2$ جول ، وفى هذه الحالة نجد أن :

$$P_a = \frac{dW_k}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{1}{2} J \omega^2 = J \omega \frac{d\omega}{dt} = T\omega \quad \cdots \text{(٢ - ٣)}$$

$$J \omega\, d\omega = T\omega\, dt$$

و بالنسبة لمفقودات العضو الدائر L_2 عند السرعة ω ، التى تتحدد باللحظة ، نجد أن :

$$L_2 = S\ P_g = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} T\omega_0 = T(\omega_0 - \omega) = \frac{dW_2}{dt} \quad \text{(٢-٤)}$$

حيث W_2 هى كمية الطاقة بالجول ، التى تتبدد على شكل حرارة فى العضو الدائر . و بذلك يكون :

$$P_g = P_a + L_2$$

$$T\omega_0 = T\omega + T(\omega_0 - \omega) \quad \cdots \cdots \cdots \text{(٢ - ٤) ب}$$

$$\therefore \int_0^{t_s} T\omega_0\, dt = \int_0^{t_s} T\omega dt + \int_0^{t_s} T(\omega_0 - \omega)\, dt$$

$$\cdots \cdots \cdots \text{(٢ - ٥)}$$

وفى هـذه الحالة تكون t_s هى زمن تعجيل عمود الادارة ،من السكون حتى يصل إلى السرعـة ω ، بالثانية ، ويكون الطرف الايسر من المعادلة

(٥ ـ ٢)عباره عن الطاقة W_g جول التى تمر عبر الثغرة الهوائيه في خلال فترة التعجيل ، والتى تنقسم إلي الجزءين W_k و W_2 ، كما يمثلها حدى الطرف الايمن للمعادلة . عند $t = t_s$ تكون $\omega_0 = \omega$ ، وبذلك يمكن كتابة المعادلة (٥ ـ ٢) ، بالتعويض من المعادلة (٣ ـ ٢) ، على النحو الآتى :

$$\int_0^{\omega_0} J\ \omega_0\ d\omega = \int_0^{\omega_0} J\ \omega\ d\omega + \int_0^{\omega_0} J\ (\omega_0 - \omega)\ d\omega$$

$$\therefore\quad J\ \omega_0^2 = \tfrac{1}{2} J\ \omega_0^2 + J\ \omega_0^2$$

$$W_g = W_k + W_2 \qquad \cdots\ \cdots\ (٢-٦)$$

وهكذا يتضح من المعادلة (٦ ـ ٢) ، بالمقارنة ، أن كمية الطاقة W_gأو $J\ \omega_0^2$ جول ، التى تمر عبر الثغرة الهوائية إلى المخرج فى خلال فترة التعجيل تنقسم إلى قسمين متساويين هما $W_k = \frac{1}{2} J\ \omega_0^2$ جول ، $W_2 = \frac{1}{2} J\ \omega_0^2$ جول ، كما سبق تعريفها . وهذا يؤكد ما سبق قوله من أن كمية الحرارة التى تتبدد فى العضو الدائر أثناء بدء دوران المحرك تزداد بشكل مزعج إذا دار المحرك وهو مرتبط ميكانيكيا بحمل ذى عزم قصور ذاتى كبير . ونظرالأن ثابت الزمن الميكانيكى θ_m للمحرك يتناسب طرديا مع عزم القصور الذاتى للكتل الموجودة على عمود الادارة ، فانه يمكن اثبات، علاقة مماثلة بين θ_m و W_k على النحو التالى ،

$$\theta_m = \omega_0 \frac{J}{T} = \omega_0^2 \frac{J}{P_g} \simeq \omega_0^2 \frac{J}{P_n} \quad \cdots\ \cdots\ (٢-٧)$$

(راجع تعريف θ_m فى الآلات الكهربية وتصميمها صفحة ٢٦٩)

$$\therefore\ W_2 = \tfrac{1}{2}\,\omega_0^2\,J = \tfrac{1}{2}\,P_g\ \theta_m \simeq \tfrac{1}{2}\,P_n\ \theta_m \qquad (٢-٨)$$

حيث P_n هى مقنن قدرة المحرك . ويمكن الحصول على القيمة المقربة لـ W_2 من المعادلة (٨ – ٢) بالتعويض عن P_n بقدرة المدخل أو بقدرة المخرج للمحرك . فى الحالة الأولى نحصل على قيمة أعلى قليلا من القيمة الحقيقية، وفى الثانية على قيمة أقل .

مثال :

A 4 Pole 50 HZ Synchronous motor , driving a Compressor , has an output of 5200 KW. Weight of the damper winding (steel) is 400 Kgs. GD^2 of the motor and Compsessor is 18 $t.m^2$. Specific heat of Steel is 482 Joules / Kg. 1°C. Find the temprature rise of the damper Winding .

تعمل ملفات التخميد كقفص سنجابى فى أثناء فترة البدء للمحرك المتزامن ، حيث يتخذ المحرك خواص تشغيل المحرك التأثيرى فى خلال ذلك . وعلى هذا الأساس نجد أن كمية الحرارة المتولدة فى خلال فترة البدء ، والتى تمثلها W_k ، تتركز فى ملفات التخميد فترفع حرارتها إلى درجات عالية ، قد تسبب لنا المشاكل ، كما سنرى من حل المثال السابق .

$$P_n = 5200 \text{ KW} , \quad n_0 = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{ r. p. m.}$$

باستخدام المعادلة (١٧ – ٥) صفحة ٢٦٩ من كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية . لايجاد قيمة θ_m من المعلومات المعطاة فى المسألة :

$$\theta_m \cong \frac{GD^2}{36.5}\left(\frac{n_0}{100}\right)^2 \cdot \frac{1}{P_n} = \frac{18000}{36.5} \cdot 15^2 \cdot \frac{1}{5200}$$

$$= 21.2 \text{ secs}$$

$$W_2 \cong \tfrac{1}{2}\,\theta_m\, P_n \cong \tfrac{1}{2} \times 5200 \times 21.2 \cong 57000 \text{ KW sec}$$

$$\cong 1.6 \text{ KWH}$$

باعتبار أن كل سعر (Calory) يساوى .0.427 Kg.m وأن كل كيلو جرام متر يساوى 9.81 Joules ، نجد أن

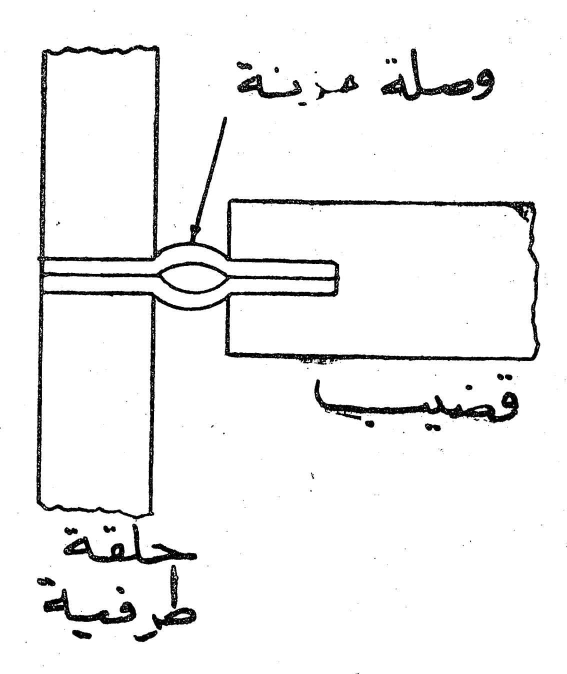
$$1 \text{ Colory} = 0.427 \text{ Kg. m.} = 0.427 \times 9.81 = 4.184 \text{ Joules}$$

إذا كانت C هى مقدار الارتفاع فى درجة حرارة ملفات التخميد درجة مئوية ، نجد أن

$$W_2 = 400 \times 482 \times C \text{ Joules}$$

$$\therefore C = \frac{57000}{400 \times 482} = 285° \text{ C}$$

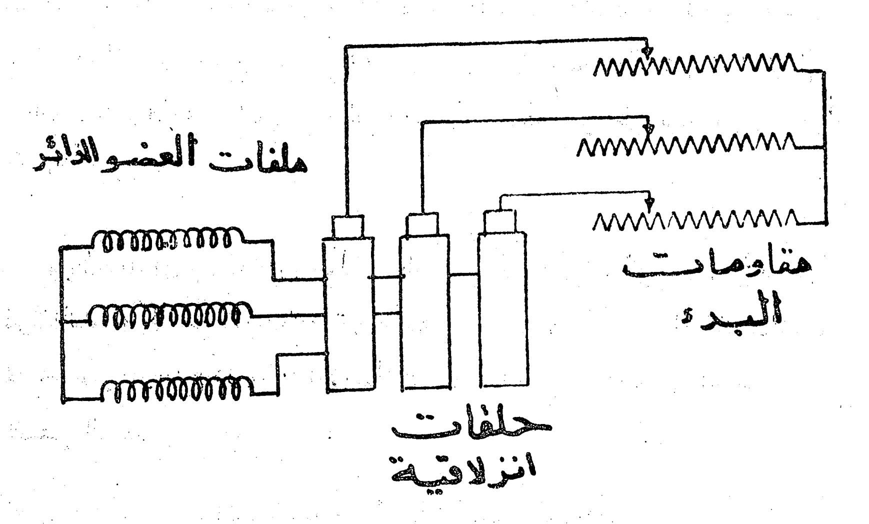
تؤكد هذه النتيجة ضرورة اتخاذ احتياطات خاصة ، بالنسبة لملفات التخميد فى مثل هذه الأحوال ، حتى لا تؤدى الاجهادات الناشئة عن تمدد القضبان ، بسبب درجات الحرارة العاليه ، إلى إحداث تلف بها . لذلك نجد أن قضبان التخميد تتصل بحلقاتها الطرفية (end rings) فى مثل هذا النوع من المحركات بوصلات مرنة تسمح لها بالتمدد دون حدوث اجهادات ضارة ، كما هو مبين فى شكل (١ — ٢) .



(شكل ١ – ٢)

(١ – ٢) استخدام مقاومات بدء موصلة على التوالى مع ملفات العضو الدائر فى المحركات ذات الحلقات الانزلاقية :

يؤدى توصيل مقاومة ثلاثية المراحل ، ذات قيمة R_{st} لكل مرحلة ، على التوالى مع ملفات العضو الدائر (شكل ٢ ـ ٢) ، إلى الحد من قيمة تيار البدء المرحلى المسحوب من الينبوع I_{st} .



(شكل ٢ ـ ٢)

$$I_{st} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2 + R'_{st})^2 + (X_1 + X'_{20})^2}} \quad \ldots \quad (٢-٩)$$

$$\phi_{st} = \tan^{-1}(X_1 + X'_{20}) / (R_1 + R'_2 + R'_{st})$$

وإلى جانب الحد من قيمة تيار البدء المرحلى ، فان المقاومة R_{st} (R'_{st} منسوبة إلى العضو الثابت) ترفع قيمة معامل القدرة عند البدء ، كما يتضح من المعادلة (٩ ـ ٢) ، وهـذا يعنى زيادة عزم دوران البدء ، كما سبق شرحـه

بالاشارة إلى المعادلة (٢٢ — ١) ، وشكل (٤ — ١) ، حيث تبين أننا نستطيع أن نحصل على قيمة النهاية العظمى لعزم الدوران عند البدء باختيار قيمة R_{st} تساوى ($X_{20} - R_2$) .

بارتفاع سرعة المحرك تقل الحاجة إلى وجود المقاومة R_{st} فى دائرة ملفات العضو الدائر ، ولذلك فانها تقلل تدريجيا ، مع ازدياد سرعة المحرك حتى تخرج من الدائرة نهائيا عندما يصل المحرك إلى سرعة دورانه المعتادة ، فتقصر ملفات العضو الدائر على الفرش مباشرة ، ثم ترفع الفرش ، مع عمل دائرة القصر على الحلقات الانزلاقية نفسها باستخدام قضيب من النحاس يمر فيها من واحدة إلى الأخرى .

ويلاحظ أن جزءا من الطاقة W_k ، التى تتبدد فى شكل حرارى خلال فترة البدء ، كما سبق شرحه ، يتولد فى مقاومة البدء ، بعيدا عن العضو الدائر ، مما يحد من ارتفاع درجة حرارة ملفات العضو الدائر ، بالمقارنة بما يحدث فى القفص السنجابى .

(٢ ــ ٢) طرق البدء المستخدمة مع محركات القفص السنجابى :

يمثل القفص السنجابى دائرة ملفات ثلاثية المراحل (فى المحركات ثلاثية المراحل) مقفلة ، لا يمكن توصيل مقاومات ، أو أى شىء آخر معها . لذلك يتعين علينا فى هــــذه الحالة أن نولى وجهنا شطر ملفات العضو الثابت ، أو الملفات الابتدائية الموصلة إلى الينبوع ، وذلك إذا أردنا اتخاذ أى إجراء من شأنه الحد من ارتفاع قيمة تيار البدء للمحرك . ومن الواضح ، بمراجعة المعادلة (٩ ــ ٢) ، أننا نستطيع اضافة المقاومة R_{st} إلى ملفات العضو الثابت للحد من قيمة تيار البدء . ولكننا نحصل فى هذه الحالة على انخفاض كبير فى قيمة عزم دوران البدء للمحرك ، على عكس ماحدث فى الحالة السابقة ، كما أن مفقودات الطاقة فى مقاومة البدء تكون كبيرة بمقارنتها بالحالة السابقة . ويمكن

تفسير ذلك إذا لاحظنا أن الضغط المرحلى لليذبوع V_1 ينقسم إلى جزءين ، أحدهما يمتص فى مقاومة البدء ، والآخر هو الذى يغذى المحرك . وهذا يعنى أن الضغط على أطراف المحرك قدقل بدرجة قد تكون كبيرة ، مما يؤدى إلى انخفاض قيمة الفيض المغناطيسى فى الثغرة الهوائية ، علاوة على انخفاض قيمة التيار .

وفى الواقع أننا لا نملك إلا أن نخفض قيمة الضغط على المحرك ، إذا أردنا خفض قيمة تيار البدء ، مع هذا النوع من المحركات ، مع التجاوز عما ينشأ عن ذلك من انخفاض في قيمة عزم دوران البدء . ولكننا نحاول ، مع ذلك ، أن لايصحب انخفاض قيمة الضغط الموصل على أطراف المحرك عند البدء مفقودات جانبية في القدرة ، كما يحدث عند استخدام المقاومات ، أو انخفاض معيب فى معامل قدرة المحرك ، كما يحدث عند استخدام الملفات الخثية (Choke Coils) . ومن الطرق التي تستخدم في هذا المضمار طريقتان تقليديتان وشائعتان وهما :

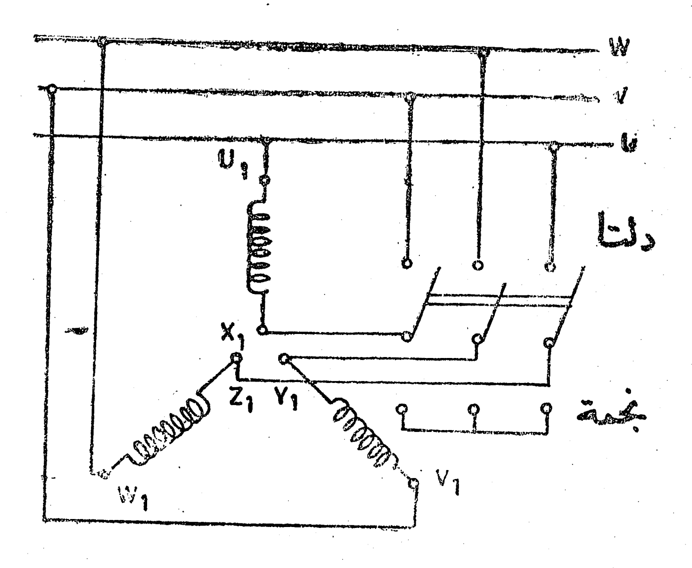
١ — استخدام مفتاح نجمه / دلتا لبدء المحرك (use of Star / delta Switch)

٢ — استخدام محول ذاتى لبدء المحرك (use of auto - transformer)

(٣ – ٢) بدء المحرك ذى القفص السنجابى باستخدام مفتاح نجمة / دلتا :

لكى يمكن استخدام هذه الطريقة يتعين أن تكون ملفات العضو الثابت للمحرك موصلة أصلا دلتا (Stator delta Connected) . وهذا يعنى أن ملفات كل مرحلة من مراحل العضو الثابت تكون موصلة على الضغط الخطى لليذبوع فى خلال فترة التشغيل المعتادة للمحرك . لذلك نستطيع خفض قيمة الضغط على ملفات المرحلة الواحدة بنسبة ($\sqrt{3}$: 1) ، أو إلي 57%

من القيمة المعتادة ، إذا قمنا بترتيب توصيل الملفات على شكل نجمة فى خلال فترة البدء،ثم أعدنا توصيلها دلتا عندما يصل المحرك إلى قرب السرعة المعتادة. وهذا هو فعلا ما يقوم به مفتاح نجمة / دلتا بالنسبة لعملية بدء المحرك ، فهو يرتب توصيل الملفات نجمة فى أحد وضعيه ، وهو الخاص بالبدء ، ثم يعيد توصيلها إلى الينبوع فى حالتها الطبيعيه دلتا ، فى وضعه الآخر ، عند نهاية فـترة البدء . ويراعى أن يكون نقل المفتاح من الوضع الأول إلى الوضع الثانى بأكبر سرعة ممكنة حتى لاتبطىء سرعة المحرك فى أثناء ذلك بشكل ملحوظ ، عندما يصبح غير موصل إلى الينبوع على الاطلاق. كذلك يزود المفتاح باصبع مانع (locking pin) ، وكامة يرتكز عليها هذا الاصبع حالما ينتقل المفتاح من وضعه الأول ، لكى لا يمكن أن يستقر المفتاح فى أى من وضعيه المذكورين عفوا ، دون ترتيب وضع الاصبع والكامة فى وضعها القديم . كذلك تكون سرعة النقل بين الوضعين لازمة حتى ينتقل المفتاح إلى الوضع الثانى قبل أن تسقط الكامة متعانقةمع الاصبع فى وضع المنع



(شكل ٣ ــ ٢)

المذكور . يبين شكل ٣ ـ ٢ تفصيلات ترتيب التوصيلات فى حالة استخدام مفتاح نجمة / دلتا ، موضحة على حسب الشرح السابق .

لابد أن يثير اهتمامنا الآن مسألتان هامتان ، وهما: (أولا) مدى الانخفاض فى قيمة تيار البدء الذى يسحبه المحرك من الخط ، في هـــذه الحالة ، بالنسبة لقيمة تيار البدء الذى يسحبه المحرك من الخط ، عندما يوصل توصيلا مباشرا عليه، وهو الذى يمثل فى الواقع تيار القصر للمحرك . (ثانيا) نسبة عزم دوران بدء المحرك ، عندما يستخدم المفتاح ، إلى عزم دوان بدء المحـرك فى حالة التوصيل المباشر .

(أولا) تيار البدء فى حالة استخدام المفتاح نجمة / دلتا : نفرض أن المعاوقة المرحلية المكافئة للمحرك ، منسوبة إلى الجانب الابتدائى ، هى Z_m ـ الضغط الخطى لليذبوع V ، والضغط المرحلى V_{ph} ـ تيار البدءفي الخط I_{Ls} ، عند استخدام المفتاح ، وهى يساوى تيار البدء فى المحرك I_{phs} ـ تيار البدء فى الخط فى حالة التوصيل المباشر I_{Ld} ، وهو نفسه كما سبق أن ذكرنا تيار القصر المسحوب من الخط ــ تيار البدء فى المحرك I_{phd} ، وهو نفسه تيار القصر للمحرك I_{sc} .

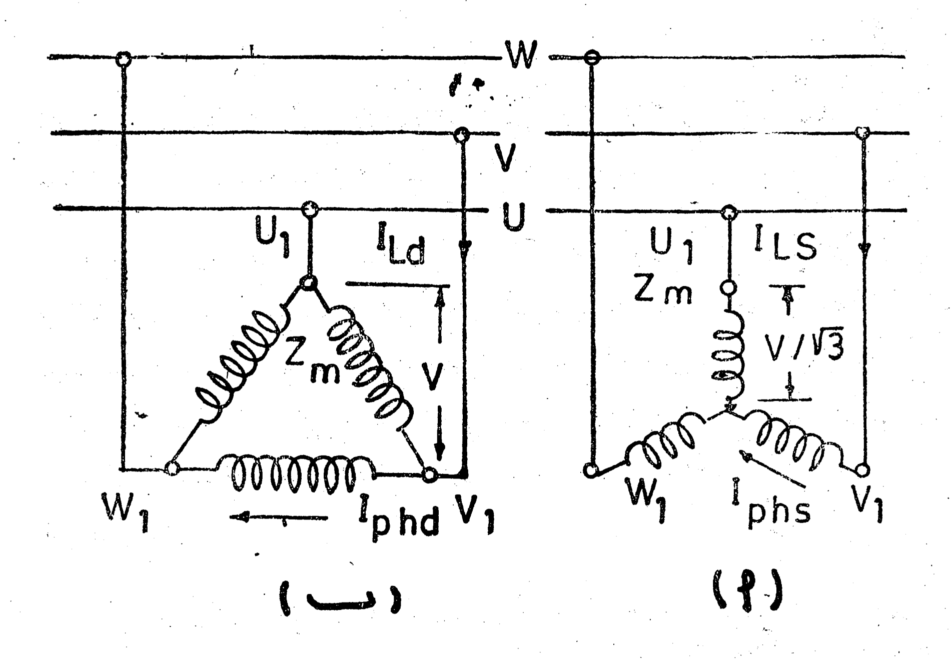
عندما يكون المفتاح فى وضع البدء تكون ملفات العضو الثابت للمحرك موصلة نجمة على الينبوع (شكل ٤ ــ ٢ ا) . وفي هذه الحالة نجد أن :

$$I = I_{phs} = \frac{V_{ph}}{Z_m} = \frac{V}{\sqrt{3}\, Z_m} \quad \cdots \cdots \cdots \quad (٢-١٠)$$

فى حالة التوصيل المباشر ، أى بدون استخدام المفتاح ، نجد أن :

$$I_{Ld} = \sqrt{3}\; I_{phd} = \sqrt{3}\; \frac{V}{Z_m} \quad \cdots \cdots \cdots \quad (٢-١١)$$

(من ١ ـ ٢) ، (١١ ـ ٢) نجد أن :



(شكل ٤ ـ ٢ أ ، ب)

$$I_{LS} / I_{Ld} = \frac{V}{\sqrt{3}\, Z_m} \Big/ \sqrt{3}\ \frac{V}{Z_m} = 1/3 \qquad \cdots \ (٢ - ١٢)$$

وهـذا يعنى أن خفض قيمة الضغط المرحلى الموصل إلى ملفات المحـرك بنسبة ($\sqrt{3}$: 1) ، نتيجة لتوصيل هذه الملفات على الينبوع نجمة بدلا من دلتا عند البـــدء ، قد أدى إلى خفض قيمة تيار البدء المسحوب من الينبوع بنسبة الثلث (3 : 1) .

(ثانيا) عزم دوران البدء فى حالة استخدام المفتاح نجمة / دلتــــا : إذا فرضنا أن عزم دوران البدء فى حالة استخدام المفتاح هو T_s ، وأن عزم دوران البدء فى حالة التوصيل المباشر هو T_d نجد أن .

$$T_s / T_d = (I_{phs})^2 / (I_{phd})^2 = \frac{V^2}{3 Z^2_m} \Big/ \frac{V^2}{Z^2_m} = 1/3$$

(٢ - ١٣)

أى أن عــــزم الدوران ينخفض بنفس نسبة انخفاض تيار الخط عند استخدام المفتاح . وهذا ما لا حيلة لنا فيه ، مقابل الانتفاع بميزة انخفاض تيار الخط عند البـدء ، بدون حدوث مفقودات قدرة جانبيـة . لذلك تجب مراعاة أن يكون عزم دوران البدء عاليا نسبياً فى المحركات ذات القفص السنجابى أصلا ، وهو ما يؤخذ فى الإعتبار فعلا عند تصميم هذا النوع من المحركات . هذا ولا يجب أن ننسى أن إستعمال مفتاح البدء نجمة/ دلتا يستلزم أن يكون التوصيل الأصلى لملفات المحرك دلتا ، فإذا كانت توصل فى وضع التشغيل المعتاد نجمة ، فلا يمكن استخدام هذا المفتاح . وفى هذه الحالة يمكن إستخدام المحول الذاتى، وهى الطريقة الثانية الشائعة الاستعمال فى بدء محركات القفص السنجابى .

(٤ ــ ٢) بدء المحرك ذى القفص السنجابى باستخدام المحول الذاتى :

تقوم فكرة استخدام المحول الذاتى ، فى هذا المضمار ، على نفس الأساس الذى تقوم عليه فكرة استخدام مفتاح نجمة دلتا، من حيث القدرة على خفض تيار البدء في الخط بدرجة مضاعفة من نسبة الخفض فى الضغط عن طريق التحويل، وبدون حدوث مفقودات قدرة جانبية . توصل ملفات المحرك (سواء كانت موصلة نجمة أودلتا) ، كما هو مبين فى شكل (٥ ــ ٢) ، إلى جانب الضغط المنخفض فى محول ذاتى ، يكون جانب الضغط المرتفع فيه موصل إلى الينبوع . فاذا كان الضغط الخطى للينبوع هو V ، مثل الحالة السابقة ، وكان المحـول يخفض الضغط بنسبة x (تكون x كسرا فى هذه الحالة) ، يصبح الضغط الخطى الموصـل إلى ملفات المحرك هو xV . فاذا كان التيار الخطى الذى يسحبه المحرك فى هذه الحالة هو I_{sm} ، فان التيار المسحوب من الخط على الجانب الآخر من المحول الذاتى I_{sa} يساوى xI_{sm} حيث.

$$\frac{I_{sa}}{I_{sm}} = \frac{xV}{V} = x \qquad (٢-١٤)$$

وإذا كان I_{sc} هو التيار الذى يسحبه المحرك لحظة البدء عنـــدمايكون موصلا توصيلا مباشراً على الينبوع بالضغط الخطى V ،وهو تيار القصر للمحرك ، كما سبق ذكره نجد أن :

$$\frac{I_{sc}}{I_{sm}} = \frac{V}{xV} = \frac{1}{x} \qquad (١٥ - ٢)$$

من (١٤ ـ ٢) و (١٥ ـ ٢) يتضح أ:

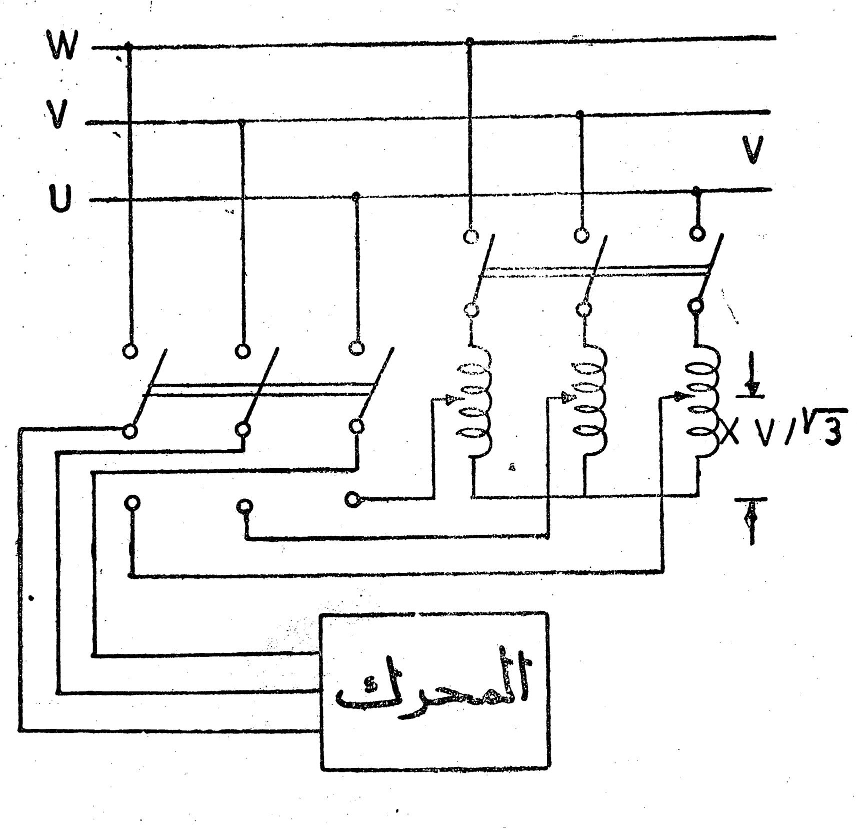
$$\frac{I_{sa}}{I_{sc}} = x^2 \qquad (١٦ - ٢)$$

وهذا يعنى خفض قيمة التيار فى الخط عند البدء بمقدار يساوى مربع نسبة الخفض ، التى يمارسها المحول الذاتى بالنسبة للضغط الذى ينقله من الينبوع إلى ملفات المحرك ، وهى ما يساوى x^2 فى هذه الحالة . كذلك نجد أن عزم دوران البدء T_{sa} ، باستخدام المحول الذاتى ، ينخفض بنسبة x^2 من قيمةعزم دوران البدء عند التوصيل المباشر T_{sc} حيث نجد أن:

$$\frac{T_{sa}}{T_{sc}} = \left(\frac{I_{sm}}{I_{sc}}\right)^2 = x^2 \qquad (١٧ - ٢)$$

يتضح لنا ، بعقـــد المقارنة بين ما حصلنا عليه من نتائج فى حالتى البدء باستخدام مفتاح نجمة دلتا ، واستخدام المحول الذاتى ، أن الطريقة الأولى ، ما هى إلا حالة خاصة مكافئة من الطريقة الثانية ، تكون فيها نسبة الخفض فى الضغط x . ويلاحظ بالرجوع الى شكل (٥ ـ ٢) أن المحرك يوصل عند استخدام المحول الذاتى أيضاً الى مفتاح ذي ناحيتين ، حيث يتم وضعه خلال فترة البدء على الناحية الموصل عليها المحول الذاتى ، وعندما تعلو السرعة الى

أقصى مدى لها يحول المفتاح الى الناحية الأخرى ، حيث يصبح المحرك موصلا توصيلا مباشراً على الينبوع.



شكل (٥ - ٢)

مثال :

A squirrel cage induction motor, when started with a star/delta switch, is found to take a starting current of 1.7 times full lond line current and give a starting torque of 35 % of full load torque. Find : (a) the full load slip of this motor; (b) the ratio starting to full load currrent, and the ratio

starting to full load torque, when the motor is started with an autotransformer having a ratio of 0.6.

فى حالة استخدام مفتاح نجمة / دلتا وبتطبيق المعادلة (١ — ٢) نجد أن :

$$(a)\ \frac{T_s}{T_{FL}} = \left(\frac{I_{phs}}{I_{phFL}}\right)^2 S_n = \left(\frac{\sqrt{3}\ I_{phs}}{I_{LFL}}\right)^2 S_n$$

$$\therefore 0.35 = (\sqrt{3} \times 1.7)^2\ S_n$$

$$\therefore S_n = \frac{0.35}{3 \times 2.89} = 0.0405 = 4.05\%$$

$$(b)\ \frac{I_{Ld}}{I_{LS}} = 3 \quad , \quad \frac{I_{LS}}{I_{LFL}} = 1.7$$

$$\therefore \frac{I_{Ld}}{I_{LFL}} = 1.7 \times 3 = 5.1$$

وهذه هى نسبة تيار البدء إلى تيار الحمل الكامل I_{LFL} (فى الخط) عند استخدام طريقة التوصيل المباشر على الينبوع،دون أى تغيير في توصيلات المحرك.ويكون تيار البدء I_{Ld} فى هذه الحاله هو نفسه تيار القصر للمحرك I_{sc} ، كما سبق أن تكررت الإشارةالية.

عند استخدام المحول الذاتى تكون قيمة x ، كما هى معطاة ، تساوى 0.6 وعند تطبيق المعادلات (١٤ ـ ٢) ، (١٥ ـ ٢) ، (١٦ ـ ٢) نجد أن:

$$\frac{I_{sm}}{I_{sc}} = \frac{I_{sm}}{I_{Ld}} = x = 0.6$$

$$\therefore \frac{I_{sm}}{I_{Ld}} \times \frac{I_{Ld}}{I_{LFL}} = 0.6 \times 5.1 = 3.06 = \frac{I_{sm}}{I_{LFL}}$$

وهـذا يعنى أن نسبة تيار البدء الداخل الى المحرك I_{sm} عند استخدام المحول الذاتى بالنسبة المعطاة ، الى تيار الحمل الكامل (الخطى والمرحلى ،لأن التوصيل دلتا فى الحالتين) تساوى 3.06 وباستخدام المعادلة (١ — ٢) فى هذه الحالة نجد أن:

$$\frac{T_{st}}{T_{FL}} = \left(\frac{I_{sm}}{I_{LFL}}\right)^2 S_n = (3.06)^2 \times 0.0405 = 0.379$$

(3) A *3*—phase, delta connected squirrel cage motor, is fed from a *400* V supply through a long cable. It is found that the motor develops the same starting torque in star and delta connections. A short circuit test in delta connection gave the following results:

$$220 \text{ V}, \quad 125 \text{ A}, \quad \cos\phi_{sc} = 0.4$$

Find the resistance of the cable and starting cnrrtens in star and delta connections.

نحصل من نتائج تجربة دائرة القصر المعطاة على المعلومات الآتيه:

$$Z_m = \frac{220 \times \sqrt{3}}{125} = 3.04 \text{ ohms}$$

$$R_m = Z_m \cos\phi_{sc} = 3.04 \times 0.4 = 1.216 \text{ ohm}$$

$$X_m = Z_m \sin\phi_{sc} = 3.04 \times 0.915 = 2.78 \text{ ohms}$$

نظراً لوجود الكابل بين الينبوع والمحرك ، فان مقاومته R تدخـل فى جميع الحسابات مضافة الى مقاومة المحرك المكافئة R_{Ieq} فى حالة التوصيل نجمة، كما هو مبين فى شكل (٦ — ٢ ا) . ولكى يمكننا عمل الحساب بنفس الطريقة

في حالة التوصيل دلتا ، فاننا نحول معاوقات المحول Z_m الى تلك التى تكافئها Z_{meq} ، وتكون موصلة نجمة ، كما هو مبين فى شكل (٦ - ٢ ب)

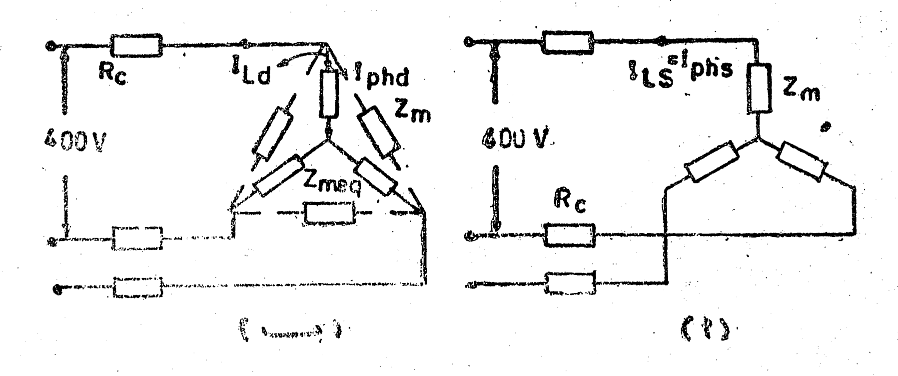
$$Z_{meq} = \frac{Z_m \times Z_m}{3\ Z_m} = \frac{1}{3} Z_m = \frac{1}{3} (1.216 + J\ 2.78)$$

$$R_{meq} = 0.405 \text{ ohm} \quad , \quad X_{meq} = 0.927 \text{ ohm}$$

لـكى نحصل على نفس عزم دوران البدء فى المحرك ، كما هو مشروط فى المسألة ، يجب أن يكون التيار المرحلى فى ملفات المحرك متساويا فى الحالتين.

$$I_{phd} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{Ld} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{400/\sqrt{3}}{\sqrt{(R + 0.405)^2 + (0.927)^2}}$$

$$I_{phs} = I_{LS} = \frac{400 / \sqrt{3}}{\sqrt{(R + 1.26)^2 + (2.76)^2}}$$



شكل (٦ - ٢)

$$\therefore\ 3\left[(R + 0.405)^2 + (0.927)^2\right] = \left[(R + 1.216)^2 + (2.78)^2\right]$$

$$\therefore\ R^2 = 3.074 \ , \quad R = 1.7052$$

$$I_{LS} = I_{phs} = \frac{400}{\sqrt{3}\ \sqrt{(2.968)^2 + (2.78)^2}} = 56.9 \text{ A}$$

$$I_{Ld} = \sqrt{3}\ I_{phd} = \frac{400\ \sqrt{3}}{\sqrt{(2\cdot159)^2 + (0.927)^2}} = 98.6 \text{ A}$$

Check : $I_{phd} = \frac{98.6}{\sqrt{3}} = 56.9, = I_{phs}$

(4) a Squirrel Cage motor has a rated Slip of 3% and a Starting current of 5 times the rated current. Calculate in terms of the rated values the starting current and approximately the starting torque :

a) For directly switching on.

b) For star-delta starting.

c) For starting by means of starting choke with a staring Current 3 times rated current.

d) For starting by means of an auto- transformer with a starting current of 3 times rated current.

$$\frac{T_{st}}{T_{fl}} = \left(\frac{I_{st}}{I_{fl}}\right)^2 \times S_n \ , \quad S_n = 0.03$$

a) $\dfrac{I_{st}}{I_{f1}} = 5 \quad , \quad \dfrac{T_{st}}{T_{f1}} = (5)^2 \times 0.03 = 0.75 = 75\%$

b) $I_{SC} = I_{Ld} \quad , \quad I_{st} = I_{LS} = I_{phs} \quad , \quad I_{phd} = \dfrac{1}{\sqrt{3}} I_{SC}$

$$\frac{I_{SC}}{\sqrt{3}\ I_{f1}} = 5 \text{ ، } \frac{I_{phd}}{I_{f1}} = 5 \text{ ، } \frac{I_{phd}}{I_{phs}} = \sqrt{3}$$

$$\therefore \quad \frac{I_{phs}}{I_{f1}} = \frac{5}{\sqrt{3}}$$

$$\frac{T_{st}}{T_{f1}} = \left(\frac{I_{phs}}{I_{f1}}\right)^2 \times S_n = \left(\frac{5}{\sqrt{3}}\right)^2 \times 0.03$$

$$= 0.25 = 25\%$$

(c) $\dfrac{I_{st}}{I_{f1}} = 3 \quad , \quad \dfrac{T_{st}}{T_{f1}} = (3)^2 \times 0.03 = 0.27 = 27\%$

(d) $\dfrac{I_{sa}}{I_{Ld}} = \dfrac{3\ I_{f1}}{5\ I_{f1}} = \dfrac{3}{5} = x^2 \ (I_{Ld} = I_{sc} = 5\ I_{f1})$

$$\therefore \quad x = \sqrt{\frac{3}{5}}$$

$$\frac{T_{st}}{T_{f1}} = \frac{T_{st}}{T_{sc}} \cdot \frac{T_{sc}}{T_{f1}} = x^2 \times 0.75 = \frac{3}{5} \times 0.74$$

$$= 0.45 = 45\%$$

ثانيا ـ طرق التحكم فى السرعة وتغيير معامل القدرة للمحرك

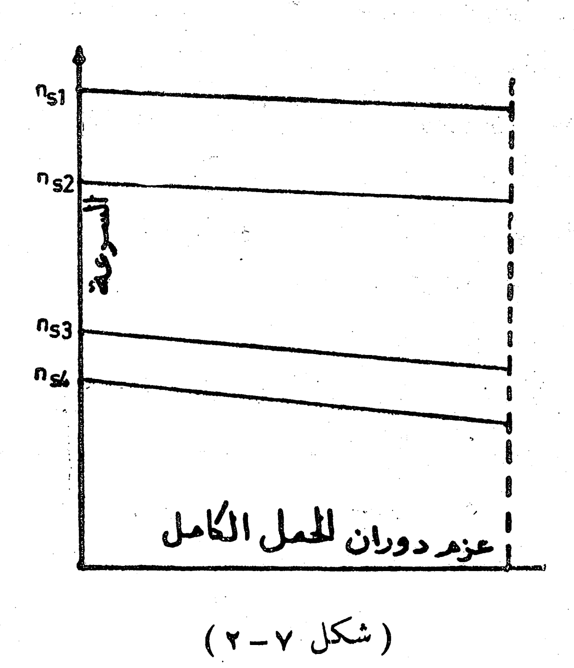
Methods of speed control and power- factor variattion of the motor

(٥ - ٢) سرعة المحرك :

يوصف المحرك التأثيرى ثلاثى المراحل بأنه من الناحية الموضوعية يمتلك سرعة ثابتة تقريبا (The motor has Substantially Constant speed) ، فسرعة المحرك فى حالة اللاحمل تختلف اختلافا طفيفا جدا عن سرعة التزامن ، كما سبق أن رأينا فى البنود السابقة ، ثم إنها لا تتغير إلا بمقدار طفيف آخر عن هذه السرعة عندما يصبح المحرك محملا بالحمل الكامل . وبناء على هذه التغييرات الطفيفة فى سرعة المحرك ، فيما بين حالتى اللاحمل والحمل الكامل ، يقال للمحرك إنه يمتلك خاصية التوازى ، (Shunt characteristic) ، كما تبين لنا فى خلال الشرح المتعلق بشكل (٤ - ١) . وقد أوضحنا فى هذا الشرح أن هذا الانخفاض الطفيف فى سرعة المحرك ، بين حالتى اللاحمل والحمل الكامل ، هو الذى يؤدى إلى اعطاء صفة الاتزان لتشغيل المحرك فى هذه المنطقة . ومن الناحية العملية ، فانه يمكن اعتبار أن المحرك ذو سرعة ثابتة خلال فترة تشغيله ، مع تغير الحمل ، وهى عبارة عن سرعة التزامن على وجه التقريب . وفى معظم التطبيقات العملية ، التى يستخدم فيها المحرك ، لا يؤدى هذا الفرض إلى خلق صعوبات أو تعقيدات تتصل بكنه الحمل أو الحسابات الخاصة به، بل إنه يتمشي معها ويسهلها ، ولا يكاد يؤثر علي درجة الدقة المطلوبة .

نحتاج فى كثير من التطبيقات العملية للمحرك إلى تغيير السرعة فى نطاق معين ، تختلف حدوده على حسب نوع التطبيق . وهذا يعنى أن السرعة عند اللاحمل تتغير بدرجة ملحوظة عن سرعة التزامن ، وكأنما تغيرت سرعة التزامن للمحرك فاصبحت هى السرعة الجديدة تقريبا . ثم إذا قمنا بتحميل المحرك فى

حالته الجديدة ، فان سرعته تتغير تغيرا طفيفا مابين حالتى اللاحمل والحمل الكامل ، على نفس المنوال كما كان يحدث فى حالته الأصلية ، لأن هذا السلوك رهن بخصائص المحرك الأساسية التى لم تتناولها يد التعديل . يبين شكل (٧ – ٢) منحنيات خواص عزم الدوران المختلفة مع السرعة ، عند تغيير سرعة المحرك الأصلية باستخدام بعض الوسائل الدخيلة ، ويتضح منها ظهور خاصة التوازى للمحرك في جميع الحالات ، مهما تغيرت سرعة اللاحمل ، التي يمكن أن نعتبرها أصبحت مناظرة لسرعات تزامن جديدة هى n_{s2} ، n_{s3} ، n_{s4} ، كما هو مبين بالرسم .



(شكل ٧ – ٢)

(٦– ٢)معامل قدرة المحرك :

يتضح لنا بمراجعة مخطط الدائرة للمحرك التأثيرى ثلاثى المراحل أن التيار الذى يسحبه المحرك من الينبوع ، فى حالة اللاحمل ، هو تيار حثى

متأخر بزاوية كبيرة على ضغط الينبوع . ويتكون هذا التيار من مركبتين ، مركبة صغيرة متفقة مرحليا مع الضغط، وهي التي تجعل المحرك يتزود نتيجة لسريانها فيه بالمفقودات الميكانيكيه ومفقودات الحديد ، ثم مركبة اكبر كثيرا من المركبة الأولى ، وهي التي تزود المحرك بالمجالي المغناطيسي اللازم لتشغيله .

وقد تم استعراض النظريات الأساسية للمحرك على أساس بقاء هاتين المركبتين ثابتتي القيمة والزاوية المرحلية، في أثناء تغير الحمل على المحرك (قد يطرأ عليهما تغير طفيف لا يؤثر اهماله تأثيرا هاما على دقه هذه النظريات) . وهذا يعني وجود مركبة دائمة ، ذات طبيعة حثية ، في التيار الذي يسحبه المحرك من الينبوع ، علاوة على أن المركبة الأخرى ، التي تسري في المحرك بسبب وجود الحمل، هي الأخرى ذات طبيعة حثية ، نتيجة لطبيعة دائرة العضو الدائرة الحثية التكوين بالضرورة . ويكون نتيجة هذا كله أن التيار الابتدائي ، الذي يسحبه المحرك من الينبوع مع أية درجة للحمل، لابد وأن يكون تيارا حثيا متأخرا على الضغط بزاوية ملحوظة . نجد على هذا الاساس أن من عيوب المحرك التأثيري البارزة صغر معامل قدرته المتأخر بالنسبة لمعامل قدرة المحرك المتزامن ، الذي يمكن التحكم فيه تحكما مطلقا بتغيير تيار التنبيه ، كما سبق شرحه بالتفصيل في كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية. ويقال إن من عيوب المحرك التأثيري أنه يمتلك معامل قدرة فقيرا (it has a poor power factor) . لذلك نتلمس الوسائل التي يمكن عن طريق استخدامها رفع قيمة معامل القدرة للتيار الحثي ، الذي يسحبه المحرك من الينبوع ، ويطلق عليها لقب وسائل تحسين معامل القدرة ، أو وسائل تصحيح معامل القدرة للمحرك

(Methods of power-factor improvement or correction)

وهناك وسائل تستخدم لتحسين معامل القدرة فقط ، كما أن هناك وسائل يقترن فيها تحسين معامل القدرة بتغيير السرعة ، كما سبق أن ذكرنا في مطلع هذا الكلام . والحقيقة الهامة ، التي يجب ذكرها في هذا المضمار ، أن

تطوير إمكانيات تشغيل المحرك التأثيرى ، باستخدام مثل هذه الوسائل ، قد جعل منه محركا يفى بمعظم الاحتياجات فى التطبيقات العملية التى تستخدم فيها المحركات الكهربية ، مما هيأ له فرصة الشيوع فى كل المجالات .

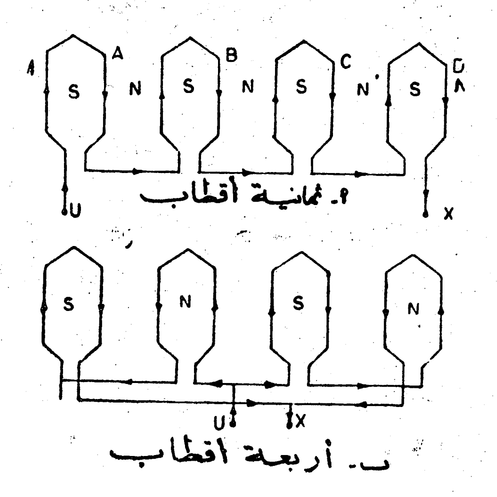
(٧-٢) الطرق الخاصة بتغيير سرعة المحرك فقط :

توجد طريقة واحدة خاصة بتغيير سرعة المحرك فقط ، لا يظهر فيها التغير فى معامل القدرة بصورة ملموسة . وتقوم هذه الطريقة على أساس تغيير عدد أقطاب المحرك ، مع ثبوت قيمة تردد الينبوع ، مما يؤدى إلى تغيير قيمة سرعة التزامن للمحرك ، وبالتالى سرعة دوران العضو الدائر ، التى تتغير تغيرا طفيفا جدا عنها ، مابين حالتى اللاحمل والحمل الكامل . ويمكن بطبيعة الحال الوصول إلى نفس النتيجة عن طريق تغيير تردد الينبوع مع الاحتفاظ بعدد أقطاب المحرك ثابتا. ونظراً لأننا نقوم بدراسة المحرك التأثيرى نفسه ، ونبحث عما يمكن أن يؤثر على خصائصه من تغييرات، نتيجة لما يطرأ على تكوينه من تعديلات ، فان الحالة الثانية لاتهمنا بقدر ما تهمنا الحالة الأولى ، التى يغلب استخدامها فى حالة المحرك ذى القفص السنجابي، نظراً لأن القفص السنجابى يمكن أن يتواءم مع المجال المغناطيسي مهما اختلف عدد أقطابه .

ونظراً لأن عدد الأقطاب للمحرك هو الذى يتحكم فى كيفية ترتيب ملفات العضو الثابت فى المجارى وتقسيمها الى مراحل ، كما سبق بيانه فى باب ملفات المنتج فى آلات التيار المتردد من كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية ، فان تغيير عدد الأقطاب فى المحرك، اللازم للتحكم فى سرعته، يستوجب اعادة ترتيب هذه الملفات على النحو الذى يؤدى الى الحصول على عدد الأقطاب المناظرة للسرعة الجديدة. وهناك طريقتان للوصول الى الغرض المطلوب فى الحياة العملية، تتم احداها بتزويد العضو الثابت للمحرك بمجموعات من الملفات مستقلة عن بعضها البعض تمام الاستقلال ، بحيث تكون كل

مجموعة خاصة بسرعة معينة ، وتوصل الى الينبوع عند ادارة المحرك على هذه السرعة ، وتتم الثانية بجعل الملفات ذات تقسيمات مختلفة ، بحيث تتصل مع بعضها البعض على الينبوع بتوصيلات معينة، باستخدام مفتاح مخصوص ، لإعطاء عدد الأقطاب المناظرة للسرعة المطلوبة . وتتصل المشاكل التي تتعلق بتنفيذ احدى هاتين الطريقتين اتصالا وثيقا بتكوين المحرك أساساً ، وتصميم ملفاته وترتيب المفتاح الخاص بتغيير السرعة ، وليس المجال هنا للتعرض لهذه المشاكل وطرق تذليلها . ويكفي أن نشير هنا الى أن عدد السرعات التي يمكن أن نحصل عليها من المحرك في هذه الحالة يكون قاصراً في الغالب على سرعتين ، وقد يصل الى ثلاث سرعات على أكثر تقدير ، حيث يصبح مفتاح السرعات ذا تعقيد كبير ، كما قد يكون من المفيد أن نشرح بعض المبادىء التي تتخذ أساسا لعمل التغييرات في توصيل الملفات لتعديل السرعة. يبين شكل (٨ - ٢) ا مجموعة من الملفات (خاصة بمرحلة واحدة من المراحل الثلاث) يكون سريان التيار فيها بحيث يتكون حولها مجال مغناطيسي ذو ثمانية أقطاب (بلغة طرق عمل الملفات يقال ان هذه الملفات مصممة لثمانية أقطاب) . نلاحظ أن الملفات تكون في هذه الحالة موصلة على التوالي بحيث يمر التيار فيها جميعاً في نفس الاتجاه ويدخل عند بداية الملف A ويخرج من نهاية الملف D .

يتبين من شكل (٨- ٢)ب أنه عند تقسيم الملفات إلى مجموعتين ، في كل مجموعة ملفان متصلان معاً على التوالي ، ثم توصيل المجموعتين معاً على التوازي إلى الينبوع ، بحيث ينعكس اتجاه مرور التيار في الملفين B , D ، عما كان عليه في شكل (٨ - ٢) أ ، ويظل كما كان في الملفين الآخرين ، فان عدد أقطاب المجال المغناطيسي حول الملفات يصبح أربعة في هذه الحالة بدلا من ثمانية . وهكذا نجد أن تغيير اتجاه مرور التيار في نصف عدد الملفات ، بمجرد تغيير ترتيب التوصيلات إلى الملفات مع الينبوع ، قد هبط بعدد الأقطاب الى



شكل (٨ - ٢)

النصف . وهذه طريقة مبسطة لبيان كيفية مضاعفة (السرعة أو تقليلها الى النصف) عن طريق تغيير توصيلات الملفات . ويتم هذا التغيير باستخدام مفاتيح جاهزة لهذا الغرض تزودبها المحركات . ويطلق على هذا الأسلوب في تغيير التوصيلات اسم توصيلات دالندر (Dahlander connection). هذا وتحتفظ الآلة في كلتا حالتي التوصيل بنفس عدد الخطوط المغناطيسية في المجال المغناطيسي لكل قطب على وجه التقريب.

تزود المحركات التي تدير آلات الورش ، التي تحتاج الى سرعات متغيرة ، بمجموعتين من الملفات ، بحيث يمكن أن تعمل احدى المجموعتين بأربعه أقطاب أو ثمانية ، و تعمل المجموعة الأخرى بستة أقطاب أو اثنا عشر قطباً ، وبذلك يمكن الحصول على السرعات ١٥٠٠ ، ١٠٠٠ ، ٧٥٠ ، ٥٠٠ لفة في الدقيقة ، عندما يتغذى المحرك من ينبوع تردده ٥٠ ذبذبة/ ثانية.

هذا و تجدر الإشارة الى أنه في حالة تغيير سرعة المحرك بتغيير عـــدد

الأقطاب بالنسبة لملفات العضو الثابت ، فانه فى حالة المحركات ذات القفص السنجابى يتواءم القفص السنجابى تلقائياً مع هذا التغيير، أما فى حالة المحركات ذات الحلقات الانزلاقية يلزم من البديهي تغيير توصيلات ملفات العضو الدائر للحصول على تغيير فى عدد أقطابها مناظر للتغيير الذى حدث فى عدد أقطاب ملفات العضو الثابت . لذلك نجد أن هذه الطريقة فى تغيير السرعة تستخدم عموما مع المحركات ذات القفص السنجابى فقط ، كما سبقت الاشارة اليه . ومن عيوب هذه الطريقة أن تغيير السرعة يتم على درجات متفاوتة تفاوتاً كبيراً (نصف السرعة أو ضعفها مثلا) ، كما أن معامل القدرة يكون عادة منخفضاً فى مثل هذه المحركات ، علاوة على التوصيلات الكثيرة ، والتى لا تسلم من التعقيد ، التى يزود بها العضو الثابت.

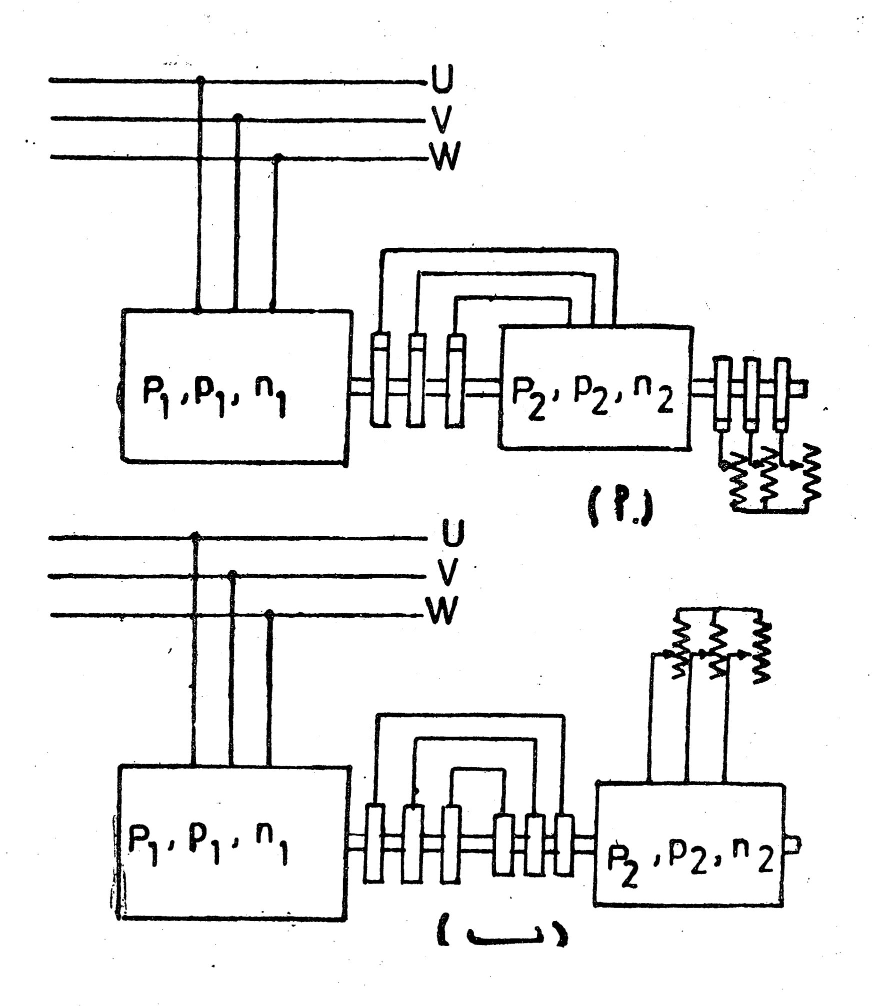
توجد طريقة أخرى لتغيير السرعة عن طريق تغيير عدد الأقطاب يستخدم فيها محركان يختلف عدد الأقطاب فى أحدهما $2p_1$ عن عدد الأقطاب فى الآخر $2p_2$ وبحيث يكون p_1 لا يساوى p_2 وتكون قدرة المحرك الأول P_1 وقدرة المحرك الثانى P_2 .

ومن البديهى أنه بتشغيل المحرك الأول نحصل على السرعة $n_1 \simeq \frac{60f}{p_1}$

وبتشغيل المحرك الثانى نحصل على سرعة أخرى $n_2 \simeq \frac{60f}{p_2}$ ، وذلك بالتوصيل على نفس اليذبوع ذى التردد f . وتكون n_1 قريبة جداً من سرعة التزامن $n_{s1} = \frac{60 f}{p_1}$ ، كما تكون n_2 قريبة جداً من سرعة التزامن

$$n_{2s} = \frac{60f}{p_2}$$

هذا ويمكن عن طريق توصيل المحركين بالتتابع (cascade connection) ، كما هو مبين فى شكل (٩ – ٢) يمكن الحصول على سرعتين أخريين ، كما يتضح من الآتى :



شكل (٩-٢)

إذا فرضنا أن f_s هو التردد فى ملفات العضو الدائر للمحرك الأول ، وهو بالتالى تردد اليذبوع الذى يغذى الملفات الابتدائية (ملفات العضو الثابت فى ا وملفات العضو الدائر فى ب) المحرك الثانى ، وأن عمود الإدارة للمحركين معا يدور بالسرعة n نجد أن:

$$f_s = \frac{n_{s1} - n}{n_{s1}} f = \frac{(n_{s1} - n)}{n_{s1}} \frac{p_1 \; n_{s1}}{60} = \frac{p_1 \; (n_{s1} - n)}{60}$$

تكون n ، سرعة عمود الإدارة المشترك بين المحركين ، قريبة القيمة جداً من n_{2s} مما يعنى أن.

$$n \cong n_{2s} \cong \frac{60}{p_2} \quad sf = \frac{(n_{s1} - n)\, p_1}{p_2}$$

$$\therefore n \cong \frac{p_1}{p_1 + p_2} n_{s1} \qquad (٢١-٢)$$

ويكون حصولنا على السرعة المعطاة بالمعادلة (٢١ - ٢) على أساس توصيل الأطراف التى تغذى الملفات الابتدائية للمحرك الثانى مع الملفات الثانوية للمحرك الأول ،بحيث يكون عزم الدوران الناشىء عن المحرك الثانى على عمود الإدارة المشترك فى اتجاه عزم دوران المحرك الأول ، مما يعنى تآزر عزمى دورانهما معاً وإعطاء مجموع قدرتيهما على عمود الإدارة عند سرعة الدوران المشتركة. فاذا كان توصيل الأطراف المذكورة بحيث يكون عزمى دوران المحركين فى اتجاهين متضادين (يمكن حدوث ذلك بمجرد تبديل طرفين من أطراف التوصيل الثلاثة) فاننا نحصل على فرق القدرتين على عمود الإدارة عند سرعة الدوران المشتركة ، ويستوجب الأمر فى هذه الحالة إعطاء n_{s2} في العلاقة السابقة اشارة سالبة (نظراً لدوران المجال المجال المغناطيسى للمحرك الثانى فى عكس الاتجاه السابق). وتكون السرعة المشتركة فى هذه الحالة عبارة عن :

$$n \cong n_{s1} \frac{p_1}{p_1 - p_2} \qquad (٢٢-٢)$$

ويمكن أن نستدل من طبيعة تركيب المعادلة (٢٢ - ٢) علي سبب اشتراطنا في بادىء الأمر أن يكون p_1 لا يساوى p_2 .

بناء على ماسبق شرحه يمكن تلخيص الامكانيات الخاصة بالقدرة والسرعة على عمود الادارة ، فى حالة وجود محركين بالمواصفات السابقة ، على النحو الآتى :

الامكانيات	القدرة على عمود الادارة	سرعة عمود الادارة المشترك
استخدام المحرك الأول بمفرده	P_1	$n \simeq n_{s1} \simeq \frac{60f}{p_1}$
استخدام المحرك الثانى بمفرده	P_2	$n \simeq n_{s2} \simeq \frac{60f}{p_2}$
توصيل المحركين بالتتالى بعزمى دوران فى نفس الاتجاه على عمود الادارة المشترك	$P_1 + P_2$	$n \simeq n_{s1} \frac{p_1}{p_1 + p_2}$
توصيل المحركين بالتتالى بعزمى دوران متضادى الاتجاه على عمود الادارة المشترك	$P_1 + P_2$	$n \simeq n_{s1} \frac{p_1}{p_1 - p_2}$

ويتضح من الجدول السابق أن قدرة المحرك الأول P_1 تكون أكبر من قدرة المحرك الثانى P_2 ، حيث أن طبيعة التوصيل بالتتالى تحتم أن تكون تغذية المحرك الثانى بالقدرة الانزلاقية (Slip power) ، الناشئة فى الملفات الثانوية للمحرك الأول . ويلاحظ أن التوصيل بالطريقة المبينة فى شكل (٩ ــ ٢) ب يمتاز عن الطريقة المبينة فى شكل (٩ ــ ٢) ا بأنه يجعلنا نستغنى عن الفرش على الحلقات الانزلاقية فى المحركين ، حيث يكون التوصيل مباشرا بينهما لأنهما تدور معا ، وهذا يعمل أيضا على توفير مفقودات الاحتكاك ، ومفقودات التلامس الكهربية ، الناشئة عن وجود هذه الفرش . هــذا ونحب أن نشير إلى أن معامل القدرة يكون منخفضا عند استخدام هذه الطريقة فى تغيير السرعة .

٢ ــ تغيير السرعــة ، مع التأثير على معامل القدرة ، باستخدام مقاومات فى الملفات الثانوية :

من البديهى أن هذه الطريقة لاتستخدم إلا مع المحركات ذات الحلقات الانزلاقية ، حيث يمكن توصيل مقاومة متغيرة ، ثلاثية المراحل ، مع ملفات العضو الدائر عن طريق الفرش . وبتغيير هـذه المقاومة يمكن الحصول على سرعات متغيرة من المحرك . ومما لاشك فيه أن إضافة المقاومة إلى دائرة الملفات الثانوية ذات الطبيعة الحثية يعمل على تحسين معامل القدرة ، ولكننا لانلتفت إلى ذلك بقدر اهتمامنا بتغيير السرعة . ويمكن أن نجمل شرح مايحدث فى هذه الحالة على النحو الآتى : إن وجود المقاومة الزائدة فى ملفات العضو الدائر يعمل على زيادة مفقودات النحاس الثانوية $P_{cu2} = sP_{12}$. ونظرا لأن ذلك لا علاقة له بقدرة المدخل إلى المحرك P_1 ، وبافتراض ثبوت قيمة P_{12} تقريبا على هذا الاساس ($P_1 \cong P_{12}$) فان تغيير قيمة P_{cu2} يؤدى إلى تغيير قيمة S ، أى إلى تغيير سرعة المحرك . وهذا يعنى أننا نستطيع خفض سرعة المحرك فقط عن طريق تبديد جزء زائد من قدرة المخرج ، التي تقل بنفس نسبة انخفاض السرعة ، مما يعمل على حفظ عزم الدوران ثابت القيمة على وجه التقريب ، وهوما يتمشي مع افتراض ثبوت قيمة ($P_{12} = T\omega_s$) ، ويكون خفض السرعة فى هـذه الحالة على حساب معامل الجودة للمحرك $\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$ ، وهو غير مستحب على الاطلاق ، علاوة على المشاكل التى يمكن أن تنشأ عن تبديد كميات كبيرة من القدرة في المقاومة الخارجية . لذلك فان هـذه الطريقة تستخدم فى أضيق الحدود ، عندما يراد تغيير سرعة المحرك بمـا لا يتجاوز حوالى ١٥٪ .

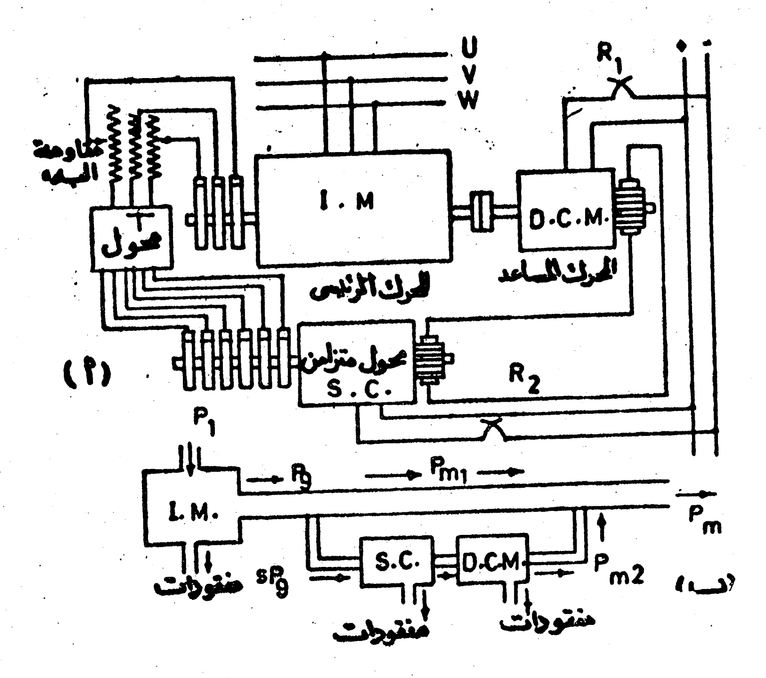
٣ ــ تغيير السرعة ومعامل القدرة باستخدام المحرك التأثيرى مع مجموعة من الآلات :

بينا فى البند السابق كيف يكون تغيير السرعة فى المحرك ناشئا أساسا عن تغيير فى قيمة المفقودات النحاسية الكلية P_{cu2} في دائرة الملفات الثانوية للمحرك ،

بحيث يمكن تبديد الجزء الزائد ، الناشىء عن خفض السرعة ، فى مقاومة خارجية توصل على التوالى مع هذه الملفات . وقد يتراءى لنا أنه بدلا من تبديد هـذه القدرة الزائدة فى مقاومة خارجية ، أن نقوم باستغلالها فى عمل نافع ، كادارة محرك مساعد auxiliary motor يشترك مع المحرك التأثيرى الرئيسى (main motor) على عمود إدارة واحد ، أو إعادة هذه القدرة بتغذية رجعية (feed back) لليذبوع الذى يغذى المحرك . ونظرا لأن هـذه القدرة تؤخذ من ملفات العضو الدائر عند سرعات مختلفة، فان ترددها يكون متغيرا على حسب تغير سرعة المحرك ، ممـا يستلزم عمل ترتيبات معينة للاستفادة بها على عمود الادارة أو قبل تغذيتها رجعيا إلى الينبوع ذى التردد ثابت القيمة f . وتختلف الترتيبات اللازمة فى كل من الحالتين بطبيعة الحال ونوجز فيما يلى شرح طريقة شائعة لكل حالة .

١ ــ توصيل كرامر المتتالى : (Kramer Cascade Connection)

يبين شكل (١٠ ــ ٢) ا كيفية توصيل المحرك التأثيرى ، ويطلق عليه اسم المحرك الأساسى ، فى مجموعة من الآلات (machine set) تتكون، علاوة على ذلك ، من محرك تيار مستمر ، ويطلق عليه اسم المحرك المساعد ، يشترك مع المحرك التأثيرى على نفس عمود الادارة ، ثم من محول دوار أو متزامن (Synchronous or rotary converter) يعمل على تحويل قدرة التيار المتردد، التى تأتى إليه من الملفات الثانوية للمحرك التأثيرى نتيجة تغيير السرعة ، إلى قدرة تيار مستمر يغذى بهـا محرك التيار المستمر . فاذا أهملنا المفقودات ، فى كل من المحـول المتزامن ، ومحـرك التيـار المستمر ، فان هـــذا يعنى أن القدرة التى تطردها الملفات الثانوية إلى خارجها ، نتيجـة خفض سرعة المحرك ، والتى كان يمكن أن تبـدد فى المقـــاومة الخارجية ، لو وجـدت موصـلة إلى الفرش بدلا من المحـول المتزامن،



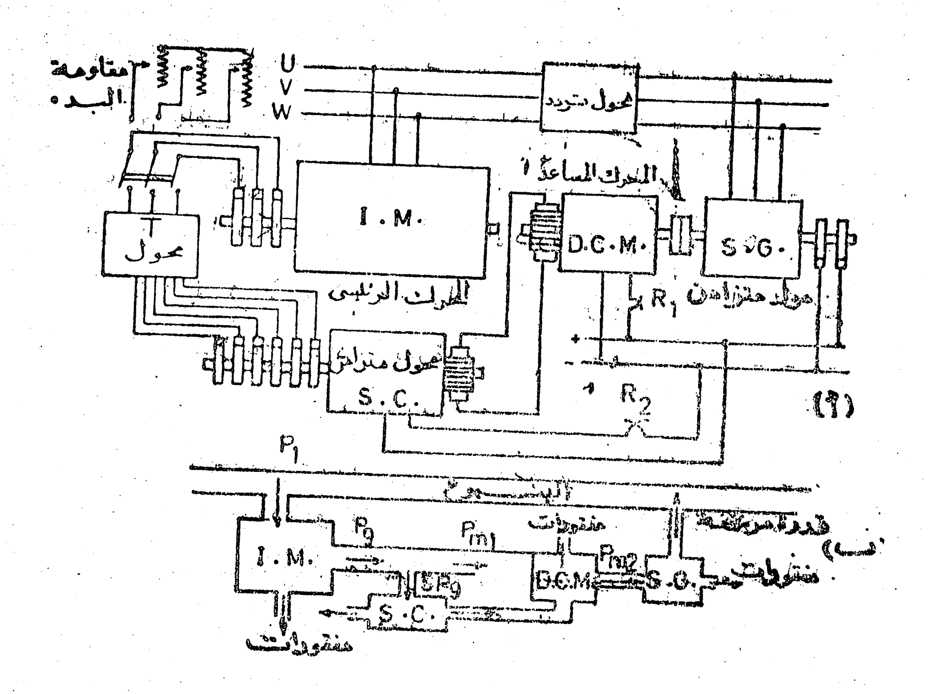
(شكل ١٠ – ٢) ا ، ب

تعود مرة أخرى لتؤدى مهمتها على عمود الادارة مع السرعة الجديدة . فاذا افترضنا ، كما سبق فى حالة المقاومة ، أن قدرة المدخل P_1 للمحرك التأثيرى لاتتغير فى خلال ذلك ، مما يعنى أن قدرة المدخل للملفات الثانوية لهذا المحرك P_{12} تظل ثابتة تقريبا ، فان القدرة التى يأخذها عمود الادارة من المحركين معا ، الرئيسى والمساعد ، لا تتغير ، على وجه التقريب ، أيضا . وهذا يؤدى إلى ازدياد عزم الدوران على عمود الادارة بانخفاض السرعـة ($P = T\omega$) . لذلك يطلق على توصيلة كرامر هـــذه اسم الادارة ذات القدرة الثابتة (Constant power drive) . والسؤال الذى يفرض نفسه علينا الآن هو كيف يتم لنا تغيير سرعة المحرك ، أو معامل قدرته . من البديهى أننا يجب أن نفرض على عمود الادارة سرعة معينة (منخفضة فرضا) يلتزم بهـا المحرك التأثيرى ، وينتج بناء علي وجودها زيادة القدرة فى الملفات الثانوية ، بحيث

يسرى الجزء الزائد من خلال المحول المتزامن إلى المحرك المساعد لكى يعطيه مرة أخرى على عمود الادارة . ويتم ذلك عن طريق تغيير سرعة المحرك المساعد بتغيير المقاومة R_1 فى ملفات مجاله . ونظرا لأن المحول المتزامن هو فى الواقع محرك متزامن ، من ناحية حلقاته الانزلاقية ، (سوف يأتى شرحه بالتفصيل فى باب تحويل الطاقة الكهربية) فان تغيير معامل قدرته ، عن طريق تغيير تيار التنبيه الخاص به بوساطة المقاومة R_2 ، يؤدى إلى تغيير معامل القدرة فى الملفات الثانوية للمحرك التأثيرى ، وبالتالي للتيار الذى يسحبه من الينبوع . ويبين شكل (١٠ – ٢) ب كيف تسرى القدرة من الينبوع حتي تصل إلى عمود الادارة بقيمة ثابتة تقريبا . وتتميز هذه الطريقة بزيادة عزم الدوران عند انخفاض السرعة ، مع ثبوت قيمة قدرة الخرج على عمود الادارة ، لذلك يحسن استخدامها فى صناعة الحديد لادارة درافيل السحب (Rolling mills)

ب – توصيل شيربيوس المتتالي : (Scherbius cascade connection)

فى هذه الحالة لاتعود القدرة الزائدة في الملفات الثانوية للمحرك التأثيرى الرئيسى ، الناشئة عن خفض السرعة ، إلى عمود الادارة بوساطة محرك التيار المستمر المساعد ، وانما تغذى رجعيا إلى الينبوع (fed back to the supply) باستخدام مولد تيار متردد ، مع الأجهزة المناسبة ، يدور مع المحرك المساعد على عمود إدارة مشترك ، مستقل عن عمود الادارة الرئيسي ، كما يتبين من شكل (١١ – ٢) ا . وهذا يعنى أن القدرة التي يأخذها الحمل على محور الادارة الرئيسي تنخفض قيمتها بما يتناسب مع انخفاض قيمة السرعة ، دون أن يؤثر ذلك تأثيرا ملحوظاً على معامل جودة المحرك التأثيرى ، كما كان يحدث فى حالة استخدام المقاومة ، لأن ما ينتقص من القدرة يغذى معظمه رجعيا إلى الينبوع (بعد ضياع ما يساوى المفقودات فى الآلات المساعدة فقط) . وتكون نتيجة ذلك أن يظل عزم الدوران المبذول



شكل (١١ - ٢) أ ، ب

من المحرك ثابت القيمة تقريبا $\left(\frac{P_2}{\omega}\right)$ ، لذلك يطلق على هـذا التوصيل اسم الادارة ذات عـزم الدوران الثابت (Constant torque drive) ، ويستخدم عندما يحتاج الحمل إلى عزم دوران ثابت القيمة عند سرعات متغيرة ، بينما يستعمل توصيل كرامر عندما يحتاج الحمـل إلى قدرة ثابتة القيمة مع سرعات متغيرة . يكون تغيير السرعة فى هـذه الحالة أيضا عن طريق تغيير قيمة المقاومة R_1 الداخلة في ملفات التنبيه للمحرك المساعد ، كما يكون تغيير معامل القدرة عن طريق تغيير قيمة R_2 أيضا . يبين شكل (١١ - ٢) ب مسار القدرة الزائدة الناشئة عن خفض السرعة حتى ترتجع إلى الينبوع . هـذا وتجب الاشارة إلى أن طريقة شربيوس الأصلية (BBC-Scherbius)

تقوم على أساس الافكار التى يوضحها شكلي (١١ - ٢) ا ، ب ، ولكن يستخدم فيهـا محرك توالى ذومبدل للتيـار المتردد . وهذا المحـرك يتغذى بالقـدرة من الحلقات الانزلاقية للمحـرك الرئيسي، ويمكن أن يدور على نفس عمود الادارة للمحرك الرئيسى ، فيرد القـدرة التى يأخذها ميكانيكيا على عمود الادارة الرئيسي ، كما يحـدث فى حالة توصيلة كرامر ، أو أنه فى حالة توصيلة شربيوس الأصلية يكون عمود ادارته مستقلا عن عمود الادارة الرئيسي ، ولكنه يدير مولدا تأثـيريا (Induction generator) ، الذى يغذى القدرة مرتجعة إلى الينبوع . هذا ونظرا لأن الطالب ليس لديه أية فكرة في الوقت الحاضر عن المحركات ذات المبدلات للتيار المتردد، أو المولد التأثيرى ،فقد حاولنا اعطاءه فكرة مبسطة،فى حدود معلوماته ، عن طريقة شربيوس الرئيسية فى تنظيم سرعة المحرك التأثيرى بالقدرة المرتجعة إلى الينبوع، دون التعرض للانوع التى لا يعرفها من الآلات.

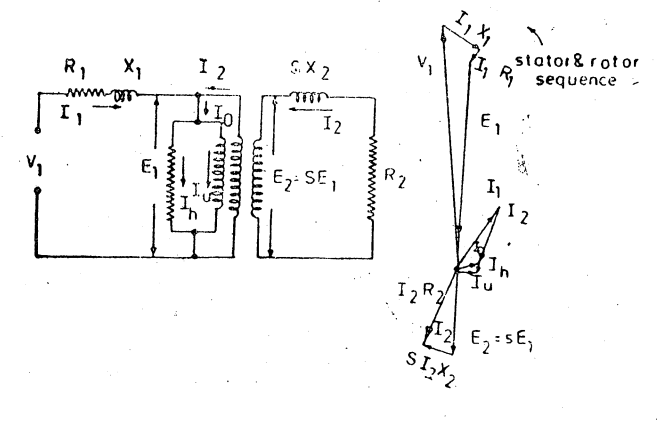
٤ - تغيير السرعة ومعامل القدرة باستخدام ضغط محقون فى الملفات الثانوية:

(Speed and power - factor Variation using injected secondary voltage)

لو تمعنا قليلا فيما يحدث عند تغيير السرعة باستخدام المقاومة الخارجية ، أو باستخدام توصيلتى كرامر وشيربيوس ، لوجدنا أن الأساس فى الأمر كلـه هو والتغير الناشىء في الضغط المرحلى للملفات الثانوية ($SE_{20} = E_{2s}$) للتغير المطلوب فى السرعة أو معامل القدرة . ويؤدى تغير السرعة أساسا إلى تغير فى قيمة (E_{2s} ($= SE_{20}$) ، كما أن تغير معامل القدرة يرتبط أساسا بالتغير فى زاوية الاختلاف المرحلى للضغط E_{2s} مع التيار الثانوى ، ومن ثم مع التيار الابتدائى، للمحرك. وهذا يلهمنا فكرة استخدام ضغط مضاد يحقن (injceted) على أطراف الملفات الثانوية ويكون تغيير قيمته سببا فى تغيير السرعـة أساسا ،

كما أن تغيير زاوية اختلافه المرحلى (مع ضغط الينبوع) ، يكون السبب الأساسى فى تغيير معامل القدرة للمحرك . والمشكلة الرئيسية ، التى تواجهنا فى سبيل الحصول على هـــذا الضغط ، هى أنه ضغط متغير التردد والزاوية المرحلية، إذ تتوقف قيمة تردده على قيمة معامل الانزلاق s ($f_{2s} = sf_1$) عند السرعة المطلوبة n ($s = \frac{n_s - n}{n_s}$) ،كما تتوقف زاويته المرحلية على مدى اختلاف معامل القدرة الجديد عن معامل القدرة الأساسى للمحرك .

فاذا فرضنا وجود ينبوع ثلاثى المراحـل ، يوصل إلى أطراف الملفات الثانوية عن طريق الفرش ، ويمكن أن يعطينا هذا النوع من التردد ، وهو أمر يمكن ترتيبه (باستخدام محول تردد بين الحلقات الانزلاقية للمحرك والينبوع ، وسوف يرد شرح محرك التردد مع آلات التيار المتردد ذات المعدلات) نستطيع أن نستطرد إلى دراسة الموضوع بطريقة سهلة بتقسيمه إلى جزءين أساسيين ، الجزء الخاص بتغيير السرعة ، والجزء الخاص بتغيير معامل القدرة. هذا ونظرا لأن الأفكار الخاصة بذلك الموضوع ، والنتائج المترتبة عليها، ترتبط ارتباطا وثيقا بقيمة الضغط E_{2s} وزاويته المرحلية، فى مخطط المتجهات للمحرك، فان خير ما نبدأ به دراستنا إعادة رسم هذا المخطط ، كما فى شكل (١٢-٢) ا ،



(ب) (ا)

شكل (١٢ - ٢) ا ، ب

مع دائرة المحرك المكافئة كما فى شكل (١٢ - ٢ب) ، مع مراعاة الدقة المتناهية بالنسبة لاوضاع المتجهات ، على حسب كونها ضغوطا أو هبوطا فى الضغط . وسوف نجد بعض الاختلاف فى هذه الحالة عما سبق بيانه فى مخطط متجهات المحرك المعطى فى الباب الأول ، ولكنه اختلاف من حيث الشكل وله مبرراته . ولتوضيح ذلك نقول ، على سبيل المثال ، ان المتجه IR فى المخطط السابق يمثل مركبة الضغط اللازمة لموازنة هبوط الضغط فى المقاومة ، ولا يمثل هبوط الضغط نفسه ، لأن اتجاه هذا الأخير يجب أن يكون في عكس اتجاه التيار ، وليس في اتجاه التيار كما هو معطى . كذلك بالنسبة للمتجه IX الذى يجب أن يكون متأخرا عن التيار بزاوية ٩٠° إذا كان يمثل هبوط الضغط الحثي . أما فى المخطط الجديد ، المعطى فى شكل (١٢ — ٢) ا ، فسوف نجد أننا نلتزم بوضع كل متجه على حسب أصله ، فلا نضع بدلا منه مركبة المتجه التي توازنه . ذلك لأننا سوف نحتاج فى النهاية إلى تحديد زاوية الاختلاف المرحلى للضغط المحقون بالنسبة لضغط الينبوع بدقة ، وهو الاساس فى رفع السرعة أو خفضها ، وتحسن معامل القدرة أو فقره . فى مخطط المتجهات المبين فى شكل (١٢ — ٢) ا نجد أن :

V_1 هو الضغط المرحلي الواصل إلى ملفات المحرك التأثيرى الابتدائية ، I_1 التيار الابتدائى المرحلى ، I_1X_1 هبوط الضغط فى ممانعة التسرب الابتدائية ، I_1R_1 هبوط الضغط فى مقاومة الملفات الابتدائية ، لكل مرحلة ، I_0 تيار اللاحمل الذى يتكون من تيار التذبيه I_u وتيار المفقودات I_h ، E_1 هى القوة الدافعة الكهربية المضادة ، المتولدة فى كل مرحلة من الملفات الابتدائية بفعل المجال المغناطيسى الدائر .

E_2 هى القوة الدافعة الكهربية المتولدة فى كل مرحلة من الملفات الثانوية بفعل المجال المغناطيسى الدائر ($E_2 = sE_1$) وفى نفس اتجاه E_1 لانهما متولدتان

بفعل نفس المجـال المغناطيسي وباعتبار أن نسبة عدد اللفات متساوى فى الملفات الابتدائية والثانوية ، أو بمعنى آخر أن E_2 منسوبة إلى الملفات الابتدائية) I_2 هو التيار الثانوى منسوبا إلى الملفات الابتدائية ، R_2 مقاومة الملفات الثانوية لكل مرحلة منسوبة إلى الملفات الابتدائية ، X_2 ممانعة التسرب المرحلية للملفات الثانوية منسوبة إلى الملفات الابتدائية في حالة السكون

$(n = o)$ ، $S = \frac{n_s - n}{n_s}$ معامـل الانزلاق عند السرعة n للمحرك ،

باعتبار أن المجال المغناطيسي يدور بسرعة التزامن n_s لفة فى الدقيقة . بتطبيق قانون كيرشوف على كل من مرحلتى الملفات الابتدائية ، والملفات الثانوية ، المبينتين فى الدائرة المكافئة شكل (١٢ – ٢) ب نجد أن :

$$V_1 + I_1X_1 + IR_1 + E_1 = O \quad \cdots \cdots \cdots \cdots \quad (٢-٢٣)$$

$$E_2 + S I_2 X_2 + I_2 R_2 = O \quad \cdots \cdots \cdots \cdots \quad (٢-٢٤)$$

بالنسبة للدائرة المغناطيسية للمحرك ، فان مجموع القوة الدافعة المغناطيسية للملفات الابتدائية مع القوة الدافعة المغناطيسية للملفات الثانوية (منسوبة إلى الملفات الابتدائية) يجب أن يساوى القوة الدافعة المغناطيسية التى تولد المجال المغناطيسى الدائر ، وهذا يترجم ، باستخدام التيارين ، الابتدائى I_1 والثانوى المنسوب I_2 ، وتيار اللاحمل I_0 ، بالمعادلة :

$$I_1 + I_2 = I_0 \qquad (٢ — ٢٥)$$

المعادلات من ٢٠ إلى ٢٢ هى معادلات اتجاهية (Vector equations) ، وجميع الحدود الداخلة فى تركيبها تمثل كميات متجهة (Vectors)، وهى ممثلة على هذا الاساس فى شكل (١٢ — ٢) ا باشكال مقفلة فى اتجـاه دائرى واحد . ويعطى حل هذه المعادلات الثلاث كل ما نحتاج إليه متصلا بخواص

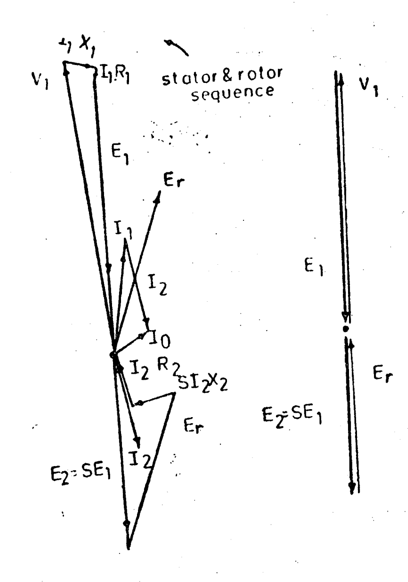
تشغيل المحرك ، كما يمكن الاهتداء بهـــا ، ممثلة على مخطط المتجهات ، بعد تعديلها باضافة الضغط المحقون ، لمعرفة طبيعة هذا الضغط المطلوبة ، بالنسبة لحجمه وزاويته المرحلية ، لكي يعطى تغييرا معينا فى السرعة أو معامل القدرة أو كليهما معا . وهذا يتم على النحو التالى :

١ ــ دوران المحرك بسرعة أقــل من سرعة التزامن (سرعة تحت التزامن Subsynchronous speed)) مع التأثير على معامل القدرة :

إذا كان E_r (كمية متجهة) هو الضغط المرحلى المحقون ، فان وجوده يؤدى إلى تعديل المعادلة (٢٤ — ٢) إلى :

$$E_2 + I_2 R_2 + SI_2 X_2 + E_r = O \qquad (٢٦ -- ٢)$$

وتظل المعادلتان الآخرتان كما هما ، فنحصل على مخطط المتجهات شكل (١٣ ــ ٢) أ ، الذى يبين كيف يؤدى انخفاض السرعة إلى زيادة مقدار E_2 ،



(شكل ١٣ ــ ٢) ا ، ب

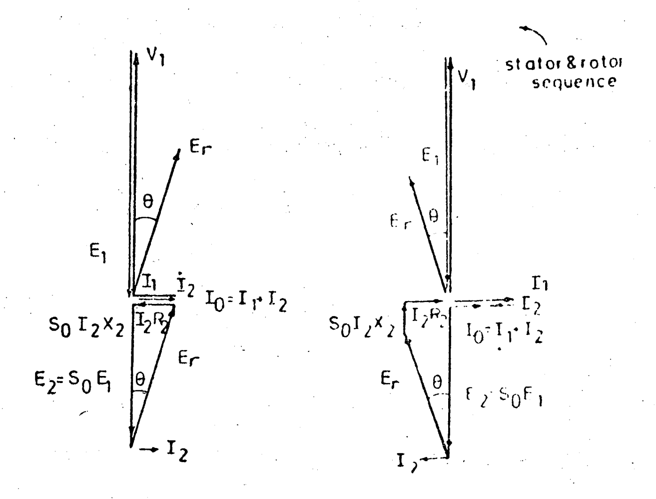
مما يستلزم وجود E_r بالعلاقة المرحلية المعطاة ، حيث يكون متأخرا على V_1 . فاذا كان انخفاض السرعة بدرجة ملحوظة ، بحيث يمكن اهمال هبوط الضغط فى كل من المقاومة وممانعة التسرب المرحلية فى الملفات ، يمكننا كتابة المعادلة (٢٦ ـ ٢) على النحو التالى :

$$E_2 + E_r \overset{\frown}{=} O \quad , \quad \therefore \; E_r \overset{\frown}{=} - E_2 \quad \cdots \cdots \quad (٢ - ٢٧)$$

يبين شكل (١٣ ـ ٢) ب مخطط المتجهات على أساس المعادلة (٢٧ ـ ٢) التي تعطينا العلاقة بين E_r ، E_2 من حيث أنهما متساويتان فى المقدار ومتضادتان فى الاتجاه . فمن ناحية العلاقة العددية يمكن أن نقول إن :

$$E_r \overset{\frown}{=} S_0 \, E_1 \quad , \quad S_0 \overset{\frown}{=} \frac{E_r}{E_1} \overset{\frown}{=} \frac{E_r}{V_1} \overset{\frown}{=} \infty \quad \cdots \quad (٢-٢٨)$$

وهذا يعنى أن قيمة الضغط المحقون E_r ، اللازم لخفض السرعة إلي حد معامل الانزلاق S_0 ، هى $S_0 \, V_1$ على وجه التقريب ، بحيث يكون متأخرا بزاوية مرحلية صغيرة بالنسبة لضغط الينبوع V_1 أو يمكن اعتباره فى اتفاق مرحلى تقريبا مع V_1 . وتكون النتيجة فى هـذه الحالة هى خفض السرعة بدون التأثير الملحوظ على معامل قدرة المحرك . فاذا أردنا التأثير على معامل القدرة بصورة ملحوظة يجب أن يتغير الوضع المرحلى للضغط المحقون E_r ، بحيث يعمل على تمرير مركبة تيار I_2 (فى حالة اللاحمل) ، متأخرة على الضغط V_1 ، فتعوض الجزء الأكبر من التيار I_0 (باعتباره مساويا I_n تقريبا) لكى يتحسن معامل القدرة ، كما يتبين لنا من شكل (١٤ ـ ٢) ا . وهـذا يعنى أن E_r تتخذ الوضع المرحلي المناسب ، بالتأخر على V_1 بالزاويه θ ، بحيث يصبح الجزء الأكبر من تيار التنبيه للمحرك (i_u) ساريا بفعل الضغط المحقون E_r ، مما يخفف من تأثيره الحثي على الينبوع الرئيسي ، فيتحسن معامل القدرة .



شكل (١٤ ـ ٢) ا ، ب

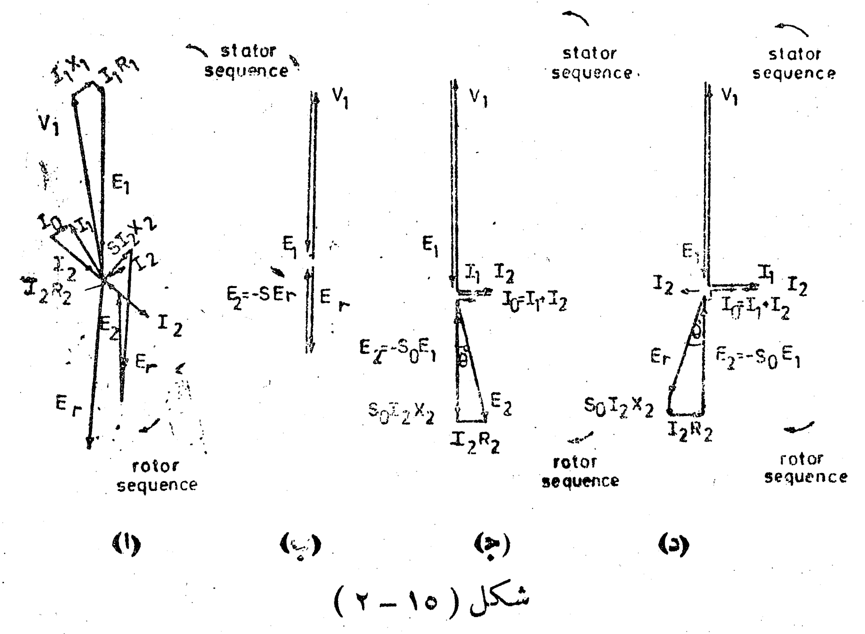
وتكون الزاوية θ سالبة في هـذة الحالة ، أى أن E_r يكون متأخرا على V_1 ، كما أن قيمة E_r العددية تكون أكبر من $S_0 E_1$ (فى حالة اللاحمل) . فاذا اصبحت قيمة θ موجبة ، أى أن E_r تقدم على V_1 مرحليا ، وكانت قيمة E_r اصغر من $S_0 E_1$ (فى حالة اللاحمـل أيضا) فان التيار I_2 الذى يسرى بفعل E_r يكون متقدما على الضغط V_1 ، مما يستدعى مرور تيار حثى كبير I_1 ، لكى يعوضه ، بالاضافة إلى مرور التيار I_0 الحثى أيضا . وهـذا يعنى فقر فى معامل القدرة، كما يظهر فى شكل (١٤ ـ ٢) ب .

ب ـــ دوران المحرك بسرعة أعلى من سرعة التزامن (سرعة فوق التزامن Super-synchronous speed) مع التأثير على معامل القدرة :

عندما يدور المحرك بسرعة أعلى من سرعة التزامن، يصبح الاتجـاه النسبي لدوران المجال المغناطيسى الدائر بالنسبة للملفات الثانوية في عكس الاتجـاه السابق ، وهذا يعني أمرين :

١ — يصبح اتجـاه القوة الدافعة الكهربية المتولدة في الملفات الثانوية فى فى عكس اتجاه القوة الدافعة الكهربية المتولدة فى الملفات الابتدائية ، أى أن $E_2 = - SE_1$.

٢ — يتغير اتجاه التعاقب المرحلى فىملفات العضو الدائر (rotor phase - Sequence) عن الحالة السابقة ممـا يؤثر على أوضاع المتجهات كما يتضح فى مخططات المتجهات شكل (١٥ — ٢) ، الذى يبين المخططات فى هــذه الحالة بالمقارنة بالمخططات فى حالات السرعة الاقل من المتزامنة وشكل (١٥ — ٢) ا يناظر شكل (١٣ — ٢)ا كما أن شكل (١٥ — ٢)ب يناظر شكل(١٣—٢)ب.



شكل (١٥ — ٢)

وتجب ملاحظة أن معامل الانزلاق أصبح ذا إشارة سالبة ، نظرا لأن العضو الدائر يدور الآن فى الاتجاه المضاد لدوران المجال المغناطيسى الدائر ، وهذا يعنى أن S — صارت تقوم مقام S بالقياس على الحالة السابقة ، ولذلك فان E_2 ، E_1 يكونان فى اتجاهين متضادين ، كما هو واضح فى المخططات فى شكل (١٥ — ٢) .

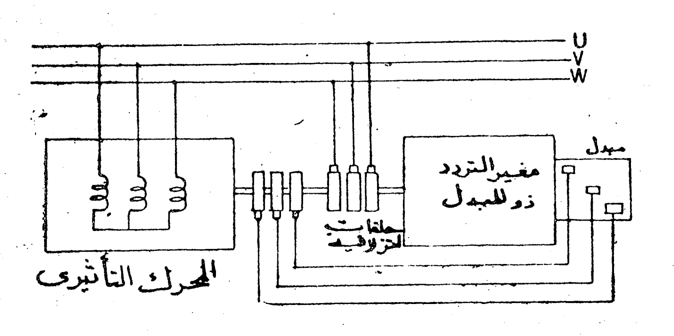
وكما سبق أن بينا في حالة تحت سرعة التزامن ، فاننا نستطيع تغيير السرعة بدون الالتفات إلى تغيير معامل القدرة ، الذى لايتأثر تأثرا ملحوظا في هذه الحالة ، كما أننا نستطيع التأثير على معامل القدرة ، بجانب تغيير السرعة . فبالنسبة للحالة الأولى نحصل على العلاقات فى مخطط المتجهات كما هى فى شكل (١٥ – ٢) ب ، وذلك مع اهمال هبوطات الضغط فى الملفات ، واعتبار حالة اللاحمل ، حيث يتبين لنا أننا نحتاج إلى ضغط محقون فى اتجاه مرحلى مضاد لاتجاه الضغط V_1 تقريبا . ويؤدى تغيير قيمة هذا الضغط المحقون إلى تغيير قيمة السرعة . أما الحالة الثانية فتفسرها العلاقات المبينة فى شكل (١٥ – ٢) حـ ، حيث يتضح لنا أن تحسين معامل القدرة ، مع رفع سرعة المحرك عن سرعة التزامن (باعتبار حالة اللاحمل) ، يحتاج إلى ضغط محقون متأخر عن ضغط الينبوع بزاوية مقدارها $(180 + \theta')$ (على أساس التعاقب المرحلى لملفات العضو الثابت) . يبين شكل (١٥ – ٢) د كيف يؤدى الحقن بضغط متقدم على ضغط الينبوع بزاوية مقدارها $(180 - \theta')$ (باعتبار التعاقب المرحلى للملفات الابتدائية) إلى فقر فى معامل القدرة، على أساس زيادة قيمة تيار الينبوع الحثى I_1 المسحوب من الينبوع فى حالة اللاحمل .

مغير التردد ذو المبدل ومحرك الشراجا:

(The commutator frequency changer and the Schrage Motor)

لكى يمكننا تغيير سرعة المحرك التأثيرى ثلاثى المراحل باستخدام ضغط محقون فى الملفات الثانوية عن طريق الحلقات الانزلاقية، يتعين علينا الحصول على ينبوع ضغط ثلاثى المراحل ذي تردد متغير، بحيث يتساوى هذا التردد مع تردد التيار والضغط فى الملفات الثانوية كلما تغيرت السرعة ، وبالتالى معامل الانزلاق S ، فى المحرك التأثيرى . وهذا يتأتى باستخدام مغير التردد ذي المبدل للحصول على الضغط المطلوب .

ويتكون مغير التردد ذو المبدل من عضو ثابت وعضو دائر . أما العضو الثابت فهو شبيه بالعضو الثابت فى المحرك التأثيرى ، ولكنه خالى من الملفات، وتكون مهمته فى هـــذه الحالة توفير المسار الحديدى المناسب، ذى المعاوقة المغناطيسية الصغيرة، لخطوط القوى المغناطيسية للمجال المغناطيسى الذى يقوم بتشغيل المحرك . وأما العضو الدائر فهو شبيه بالعضو الدائر فى المحرك التأثيرى ذى الحلقات الانزلاقية ، ولكنه يختلف عنه من ناحيتين : (أولا) أن المجارى تحتوى على نوعين مختلفين من الملفات ، منفصلين عن بعضها تمام الانفصال ، أحدهما عبارة عن ملفات ثلاثية المراحل (رئيسية موصلة إلى الحلقات الانزلاقية فى ناحية من العضو الدائر) والآخر عبارة عن ملفات شبيهه بملفات التيار المستمر (مساعدة موصلة إلى مبدل فى الناحية الأخرى من العضو الدائر)، كما هو مبين في شكل (١٦ – ٢) . ويرتكز على هذا



شكل (١٦ – ٢)

المبدل ثلاث مجموعات من الفرش ، موصلة إلى فرش الحلقات الانزلاقية فى المحرك التأثيرى المراد حقنه بالضغط المطلوب (ثانيا) وجود المبدل، إلى جانب الحلقات الانزلاقية ، ونوعين من الملفات ، كما سبق ذكره فى أولا ، علاوة على أن الملفات الرئيسية المتصلة بالحلقات الانزلاقية تتغذى من ينبوع التيار المتردد ثلاثى المراحل ، وذلك عن طريق فرش الحلقات الانزلاقية التى توصل

إلي الينبوع. وفي هذه الحالة يتولد مجال مغناطيسي دائر يدور بالنسبة لملفات العضو الدائر بسرعة التزامن n_s ،التي ترتبط بتردد الينبوع f وعدد الأقطاب 2p المصممة على أساسها الملفات بالعلاقة $n_s = \frac{60\ f}{p}$. ويتوقف اتجاه دوران المجال بالنسبة للملفات على تعاقب توصيل مراحل الملفات إلى الينبوع، وبذلك يمكن عكس هذا الاتجاه عن طريق تبديل توصيل اثنين من الفرش إلى الينبوع . هذا وتتوقف سرعة دوران المجال المغناطيسى المطلقة بالنسبة الى الفراغ (absolute speed with respect to space) علي اتجاه دوران العضو الدائر وسرعته n . فاذا كان المجال المغناطيسي يدور بالنسبة للملفات العضو الدائر بالسرعة r_s في نفس اتجاه دوران العضو الدائر بالسرعة n ، يصبح المجال المغناطيسى دائرا فى الفراغ بمجموع السرعتين $(n_s + n)$ ، أما إذا كان المجـــال المغناطيسي يدور بالنسبة لملفات العضو الدائر بالسرعة n_s فى عكس اتجاه دوران العضو الدائر بالسرعة n ، يصبح المجال المغناطيسى دائراً فى الفراغ بفرق السرعتين $(n_s - n)$.

هذا وبالنسبة للملفات المساعدة الموصلة إلى المبدل ، فانها سوف تحتوى على قوة دافعة كهربية يكون ترددها هو نفس تردد الينبوع f ، وذلك لأن المجال المغناطيسي يدور بالنسبة لها (وهى راقدة فى مجارى العضو الدائر) بالسرعة n_s ، كما أنها مصممة على أساس نفس عدد الأقطاب للملفات الرئيسية 2p $(f = \frac{pn_s}{60})$. ولكن ترددالقوى الدافعة الكهربية(أوالضغوط)المستخلصة من المبدل عن طريق الفرش المرتكزة عليه (وهى ثابتة في الفراغ) يتوقف على السرعة المطلقة للمجال المغناطيسي بالنسبة للفراغ [راجع كتاب هندسة الآلات الكهربية ص٣٠٧]

وهذا يعنى أنه عندما يدار العضو الدائر لمغير التردد ذى المبدل فى عكس اتجاه دوران المجال المغناطيسى الناشىء عنه [بترتيب اتصال فرش الحلقات الانزلاقية بالينبوع بتعاقب معين] فان تردد القوى الدافعة الكهربية المأخوذة

من فرش المبدل يكون متناسباً مع تردد اليذبوع بالمقدار $\frac{n_s - n}{n_s}$ ، أى أن التردد يكون عبارة عن sf ، حيث s هو معامل الانزلاق المناظر لسرعة التزامن n_s مع سرعةالدوران n .

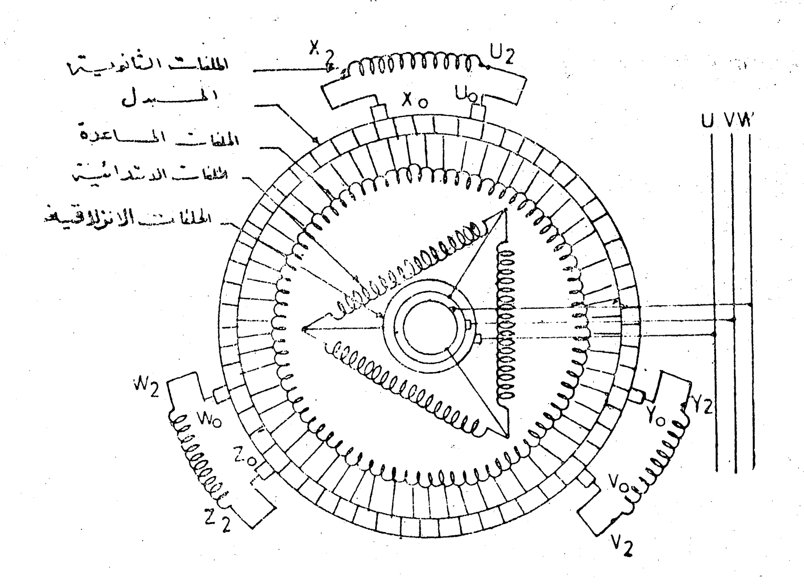
على هذا الأســـاس يتم ربط مغير التردد ذى المبـدل ميكانيكيـا (mechanical coupling) بالمحرك التأثيرى المراد حقن عضوه الدائر بالضغط ذى التردد المتغير ، بحيث يقوم المحرك التأثيرى بادارة مغير التردد ذى المبدل فى عكس اتجاه دوران مجاله . وتكـون تغذية المحـرك التأثيرى من نفس الينبوع ذى التردد f ، وعدد أقطابه 2p أيضاً، وسرعة التزامن فيه بناء على ذلك n_s ، ومعامل الانزلاق $S = \frac{n - n_s}{n_s}$ ،وذلك عندما يدور ويدير مغيرالتردد معه بالسرعة n . ويتم ترتيب اتصال كل من مغير التردد والمحرك التأثيرى بالينبوع على أساس التعاقب المرحلى لكل منهما ، الذى يـؤدى إلى جعل المحرك التأثيرى يديرمغير التردد فى عكس اتجاه دوران مجاله المغناطيسى كما سبق ذكره . بهذا نضمن حقن الملفات الثانوية للمحرك التأثيرى عن طريق حلقاته الانزلاقية بالضغط المناسب لتغيير السرعة ، بحيث يكون تردد هـذا الضغط مساويا لتردد الضغط فى الملفات الثانوية عند جميـع السرعات .

هذا ، ويحتاج تغيير السرعة إلى تغيير فى قيمة الضغط المحقون ، إلى جانب تغيير اختلافه المرحلى مع ضغط الينبوع ، ويتم ذلك عن طريق التحكم فى أوضاع الفرش على مبدل مغير التردد . وقد نحتاج إلى وضع محول بين الفرش على مبدل المغير والفرش على الحلقات الانزلاقية للمحرك للمساعدة فى الوصول إلى الغرض المطلوب.

لا شك أنه سوف يتبادر إلى ذهننا الخاطر الذى يتساءل عما إذا كان من الممكن استغلال مجارى العضو الثابت فى مغير التردد لتبسيط المجموعة السابقة

مع الوصــول الى نفس الهدف . ويجيب محرك الشراجا على هذا التساؤل بالايجاب ، بطريقة تدعو الى الاعجـاب حقاً ، حيث يجمع فى آلة واحـدة نفس المهام التى تؤديها الآلتين السابقتين، ويوفر لنا محركا من النوع التأثيرى، ادخلت عليه بعض التعديلات ، بهدف الحصول على محرك تأثيرى ذى سرعات متغيرة ، دون الاستعانة بترتيبات خارجية.

ويتكون محرك الشراجا من عضو ثابت يحتوى على ملفات ثلاثية المراحل، على نمط المحرك التأثيرى ، ومن عضو دائر يحتوى على نوعين من الملفـات، رئيسية متصلة بحلقات انزلاقية ، ومساعدة متصلة بالمبدل ، على نمط العضو الدائر فى مغير التردد ذى المبدل ، (شكل (١٧ – ٢) . وتكون الملفــات



(شكل ١٧ – ٢)

الرئيسية والملفات المساعدة فى مجارى العضو الدائر معزولة عن بعضها البعض تماما ، وترقد كل منها فى طبقة مستقلة من هــذه المجارى ، التى تصنع عــلى شكل خاص ، لـكى تعطى للملفات ثوابت معينة . أما ملفات العضو الثابت فهى

مرتبة فى المجارى على نمط الملفات ثلاثية المراحل فى المحرك التأثيرى .
ويوصل طرفى كل مرحلة من هذه الملفات الى زوج من مجموعات الفرش التى ترتكز على المبدل، بالنسبة لكل زوج من الأقطاب . ونرمز فى الرسم لطرفى المرحلة الأولى بالرمزين U_0 و X_0 ، وطرفى المرحلة الثانية بالرمزين V_0 و Y_0 ، وطرفى المرحلة الثالثة W_0 و Z_0 . ويجب أن نلاحظ أن كل طرف من هذه الأطراف يوصل الى مجموعات من الفرش عددها يساوى عدد أزواج الأقطاب (p) ، اذا كانت الملفات المساعدة ملفوفة لفا انطباقياً ، نظراً لأن نفس ترتيب الملفات يتكرر مع كل زوج من الأقطاب . أما اذا كان اللف تموجيا ، فقد نكتفى بتوصيل مجموعة واحدة من الفرش الي كل طرف ، أو نزيد على ذلك على حسب كثافة التيار .

وعندما تكون مجموعتا الفرش الموصلتان الى طرفى احدى المراحل مرتكزة على قطعة مبدل واحدة ، تصبح هذه المرحلة مقصورة . وتتحرك الفرش على المبدل بترتيب ميكانيكى عن طريق عجلة تدار باليد (أو بمحرك)، بحيث يكون الانفراج الناشىء بين كل مجموعتين موصلتين الى طرفى احدى المراحل واحدا فى المراحل الثلاث، كما أن الانفراج يمكن أن يكون متماثلا على جانبي المرحلة (لتغيير السرعة فقط) ، أو قد تسبق احدى مجموعتى الطرفين الأخرى فى حركتها ، بحيث يصبح الانفراج غير متماثل على جانبي المرحلة (لتغيير السرعة ومعامل القدرة فى نفس الوقت) .

هذا ، وبعد أن يكون وضع مجموعتى فرش طرفى المرحلة على نفس قطعة المبدل ، حيث تكون ملفات المراحل الثلاث مقصورة ، يمكن أن يكون الانفراج فى اتجاه يؤدى إلى إعطاء خفض فى السرعة مثلا ، كما أنه يمكن أن يكون فى الاتجاه المضاد (عند عكس اتجاه حركة كل من

مجموعتى الفرش على طرفى المرحلة) ، بحيث يؤدى إلى إعطاء ارتفاع فى السرعة فى هذه الحالة . وفى كلتا الحالتين يكون التغيير فى السرعة متناسباً مع مقدار الانفراج ، الذى يحدد فى هذه الحالة قيمة الضغط المأخوذ من الملفات المساعدة (على أساس عدد قطع المبدل التي تحصرها زاوية الانفراج)، وهو الضغط المحقون فى الملفات الثانوية ، التي تحتل مجارى العضو الثابت للمحرك .

بذلك نرى أن ملفات العضو الثابت سوف تعتبر هى الملفات الثانوية فى هذا المحرك، بينما تعتبر الملفات الرئيسية ، ثلاثية المراحل، الموجودة على العضو الدائر، هى الملفات الابتدائية ، التي يتم تغذيتها من الينبوع. وهذا أول الفروق الجوهرية بين محرك الشراجا والمحرك التأثيرى المعتاد . ويكون الفرق الثاني فى وجود الملفات المساعدة التى تستخدم في حقن الملفات الثانوية بالضغط اللازم لتغيير السرعة . ونبين فيما يلى كيف يتم تشغيل المحرك بهذه الأوضاع، بحيث يستوفى الشرط اللازم بأن يكون تردد الضغط المحقون مساويا لتردد ضغط الملفات الثانوية عند السرعات المختلفة . أما بالنسبة لقيمة الضغط المطلوب، فهى تتحدد على أساس زاوية انفراج مجموعتى الفرش على طرفى كل مرحلة ، كما سبق ذكره.

يمكن تفسير ما يحدث فى محرك الشراجا على أساس نظرية تشغيل المحرك التأثيرى المعتاد على النحو التالي : عند تغذية الملفات الرئيسية (الابتدائية) فى محرك الشراجا من الينبوع ثلاثى المراحل تكون هذه الملفات ، مع العضو الدائر الذى تحتل أجزاء من مجاريه ، في حالة سكون لأول وهلة ، وينشأ مجال مغناطيسى دائر ، يدور بالنسبة للملفات ، وللعضو الدائر الذى يحملها وما زال ساكناً، فى أحد الاتجاهين (فى اتجاه أو عكس اتجاه عقربى الساعة على حسب التعاقب المرحلي للتوصيل) ، وذلك بسرعة التزامن n_s

على أساس العلاقة المعروفة $\frac{pn_s}{60} = f$. بالقياس على طريقة تشغيل المحرك التأثيرى المعتاد نجد أن النتيجة المباشرة لتسلسل الأمور هو دوران العضو الذى يحمل الملفات الثانوية ، أى العضو الثابت فى محرك الشراجا ، وهذا غير ممكن بطبيعة الحال . ويكون رد الفعل المقابل لذلك فى هذه الحالة ، وهو الذى يعطى تأثيرات بديلة مماثلة ، أن يدور العضو الدائر نفسه فى عكس اتجاه دوران المجال المغناطيسى الذى أنشأه .

وتتوالى الأمور بعد ذلك بصورة مشابهة لما يحدث فى المحرك التأثيرى المعتاد ، فتزداد سرعة العضو الدائر n ، وتتغير قيم القوى الدافعة الكهربية والتيارات المنتجة فى الملفات الثانوية بالتأثير ، على أساس تغير قيمة معامل الانزلاق s . وتتحدد قيمة معامل الانزلاق S على أساس سرعة المجال المغناطيسى بالنسبة للملفات الثانوية ، وهى $n_s - n$ فى المحرك التأثيرى المعتاد ، ولها نفس القيمة فى محرك الشراجا ، وذلك لأن العضو الدائر فى هذا المحرك يدور بالنسبة لهذه الملفات ، و بالتالى بالنسبة للعضو الدائر نفسه ، بالسرعة n_s فى عكس الاتجاه ، فتكون سرعة المجال المغناطيسى المطلقة بالنسبة للفراغ ، و بالنسبة للملفات الثانوية على العضو الثابت ، هى $n_s - n$ كما فى المحرك التأثيرى المعتاد . وهذا يعنى أن قيمة القوة الدافعة الكهربية المتولدة بالتأثير بفعل المجال المغناطيسي الدائر تتناسب مع معامل الانزلاق s ، وكذلك ترددها وتردد التيارات السارية بفعلها . وتكون قيمة القوة الدافعة الكهربية المرحلية عندما يكون العضو الدائر ما زال فى حالة السكون القوة الدافعة الكهربية السكونية كما أسميناها فى حالة المحرك التأثيرى المعتاد) E_{20} متوقفة على عدد اللفات لكل مرحلة فى الملفات الثانوية على العضو الثابت ومعامل اللف ، وعدد خطوط المجال المغناطيسي المتبادل ϕ_m ، (وهو المجال المغناطيسي الدائر الناشىء عن ملفات العضو الدائر الواصلة

إلى اليذبوع) . كذلك تكون قيمة القوة الدافعة الكهربية المرحلية فى الملفات الثانوية عند أى معامل انزلاق S هى $E_{2s} = SE_{20}$ وترددها $f_{2s} = sf_1$ ، تماما كما هو الحال فى المحرك التأثيرى المعتاد ، غاية ما فى الأمر هو أن الملفات الابتدائية والملفات الثانوية تبادلت مواقعها ، فاصبحت الابتدائية على العضو الدائر ، وأصبحت الثانوية على العضو الثابت ، دون أدنى تغيير فى خواص التشغيل للمحرك التأثيرى المعتاد ، المتعلقة بوجود نوعى الملفات على محرك الشراجا .

بناء على ذلك كله ، نجد أنه عندما تكون كل مجموعتين من الفرش المتصلة بطرفي نفس المرحلة (X_0 ، U_0 أو Y_0 ، V_0 أو Z_0 ، W_0) مرتكزة على احدى قطع المبدل فان المراحل الثانوية الثلاثة تصبح فى حالة قصر ، ويعمل محرك الشراجا كمحرك تأثيرى معتاد انعكس وضع ملفاته الإبتدائية والثانوية ، ولكنه يمتلك نفس خواص تشغيل المحرك التأثيرى المعتاد بالضبط . وعلى هذا الأساس فان محرك الشراجا يدور فى هذه الحالة بسرعة n لفة فى الدقيقة قريبة جدا من سرعة التزامن n_s لفة فى الدقيقة ، التى تتحدد مع اقطاب المحرك $2p$ وتردد اليذبوع بالعلاقة $n_s = \frac{60f_1}{p}$ ، ويكون معامـــل الانزلاق هو

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot$$

أما بالنسبة للملفات المساعدة ، فان المجال المغناطيسى ، الناشىء عن الملفات الابتدائية الموجودة معها على العضو الدائر فى نفس المجارى ، يدور بسرعـة التزامن n_s بالنسبة لها . وعلى ذلك فان القوى الدافعة الكهربية التى تتولد فى الملفات المساعدة بفعل المجال المغناطيسي الدائر تتناسب فى مقاديرها مع f_1 ، ويكون ترددها f_1 أيضا . ولكن عند أخذ هذه القوى الدافعة الكهربية من الفرش عن طريق المبدل ، تكون قد مرت بعملية التبديل التى تجعل ترددها f_b مناظرا لعدد الاقطاب $2p$ وسرعة المجال المغناطيسى بالنسبة للفرش الثابتة ، أى

سرعة المجال المغناطيسي المطلقة بالنسبة للفراغ ، وهى $(n_s - n)$ ، كما سبق شرحه (راجع التبديل فى كتاب هندسة الآلات الكهربية صفحة ٣٠٥) .

وهـذا يعنى أن الضغط E_b الذى يؤخذ بين طرفي كل مجموعتين من مجموعات الفرش على طرفى كل مرحـــلة من المراحل الثانوية ، عند انفراج هاتين المجموعتين على سطح المبدل ، تتوقف قيمته على مقدار زاوية الانفراج ، وبالتالى عدد قطع المبدل المحصورة بين المجموعتين ، ويكون تردده f_b عبارة عن $f_b = \frac{(n_s - n)}{60} = s\, f_1$ ، وهو تردد القوى الدافعــة الكهربية المتولدة فى الملفات الثانوية . وهذا مايجعل E_b صالحا للاستخدام لحقن الملفات الثانوية لتغيير سرعة المحرك . ومن ناحيــة أخرى فان اتجاه E_b يمكن أن يتغير إذا تغير اتجاه حركة مجموعتى الفرش على طرفى كل مرحلة ، بمعنى أنه إذا كانت E_b تصبح فى اتجاه E_{2s} عندما تتحرك الأطراف W_0 و V_0 و U_0 فى اتجاه معين على سطح المبدل (وتتحرك Z_0 و Y_0 و X_0 فى نفس الوقت فى الاتجاه المضاد لاعطاء زاوية انفراج معينة) ، فان عكس اتجــاه حركة نفس هذه الأطراف بحيث تتحرك في الاتجــاه المضاد على سطح المبدل ، يجعل E_b تصبح فى عكس اتجاه E_{2s} ، ممـا يعني اختلافها فى الاشارة .

إن التعادل الذى يحدث بين الضغط المحقون من الفرش فى كل مرحــلة $\pm E_b$ ، والقوة الدافعة الكهربية المرحلية E_{2s} ، التى تتولد فى هذه المرحلة بفعل المجال المغناطيسي الدائر ، هذا التعادل هو الذى يحدد السرعة التي يدور عندها المحرك على النحو التالي :

$$E_{2s} = \pm E_b$$

$$sE_{20} = \pm E_b \ , \ (n_s - n)\, E_{20} = \pm n_s\, E_b$$

$$n = n_s \left(1 \mp \frac{E_b}{E_{20}} \right) \quad \cdots\cdots\cdots \quad (٢ - ٢٩)$$

ومما تجدر ملاحظته أنه عندما تكون E_b فى اتجاه E_{2s} ($E_{2s} = + E_b$)، فاننا نحصل على السرعات المنخفضة $n = n_s \left(1 - \frac{E_b}{E_{20}}\right)$ ، وهى السرعات التى تقل عن سرعة التزامن n_s (subsynchronous) . وعندما تكون E_b فى عكس اتجاه E_{2s} ($E_{2s} = - E_b$) ، فاننا نحصل على السرعات المرتفعة $n = n_s \left(1 + \frac{E_b}{E_{20}}\right)$ ، وهى السرعات التى تعلو عن سرعة التزامن n_s (supersynchronous) . وبذلك فان تغيير السرعة فى محرك الشراجا ينشأ أساسا عن طريق تغيير قيمة E_b واتجاهها بالنسبة لـ E_{2s} ، وهذا يكون بتغيير قيمة زاوية انفراج طرفى كل مرحلة على سطح المبدل ، ثم تغيير اتجاه حركة هذين الطرفين فى اثناء الانفراج .

ويعتبر محرك الشراجا من أوسع المحركات الكهربية انتشارا ، وهو يستخدم بكثرة فى مصانع النسيج ، التى تحتاج إلى محركات متغيرة السرعة . هذا ويتم تحريك الفرش على سطح المبدل اما يدويا بوساطة عجلة تنقل الحركة اليدوية إلى حاملات الفرش عن طريق صندوق تروس (Gear Box) ، أو بوساطة محرك مرشد صغير يتم التحكم فيه باستخدام زرار ضاغط ، بحيث تواصل الفرش حركتها مادام الضغط مستمرا على الزرار الذى يجعل المحرك المرشد دائرا .

هـــذا ونظرا لأن القدرة P_{st} التى يأخذها محرك الشراجا عند البدء من الينبوع تتناسب طرديا مع السرعة الزاوية ω_{st} وعزم دوران معين T_{st} عند البدء $\left(T_{st} = \frac{P_{st}}{\omega_{st}}\right)$ ، يجب أن يراعى وجوب بدء المحرك على أدنى سرعة له n_{min} ، لـكى يسحب المحرك أقل تيـار ممكن عند البدء . فاذا كان أقصي انفراج للفرش يعطى قيمة النهاية العظمى للقوة الدافعـة الكهربية بين كل مجموعتين من الفرش E_{bm} ، التى تحقن فى كل مرحـلة من المراحل الثانوية ، نجد عندما تكون E_{bm} و E_{20} فى نفس الاتجاه أن :

$$n_{min} = n_s \left(1 - \frac{E_{bm}}{E_{20}}\right) \qquad (٢ - ٣٠)$$

وبديهى أنه عندما تكون E_{bm} و E_{20} فى اتجاهين متضادين ، فإنهما تكونان مختلفتين في الاشارة ، وحينئذ فان المحرك يعطى أعلى سرعة له n_{max} حيث تكون

$$n_{max} = n_s \left(1 + \frac{E_{bm}}{E_{20}}\right) \qquad (٢ - ٣١)$$

وقد سبق أن بينا أن تردد الضغط فى الملفات المساعدة هو تردد الينبوع f_1 ، لذلك فان الضغط E_{bm} المأخوذ من هذه الملفات عن طريق المبدل لا تتوقف قيمته على السرعة ، وانما تتوقف على عدد قطع المبدل التى يحصرها اقصى انفراج لزاوية مجموعتي الفرش على طرفى كل مرحلة ، وهذا العدد ثابت فى نفس المحرك بطبيعة الحال . ونظرا لأن قيمة كلا من E_{20} و E_1 تتوقف على f_1 ايضا ، إلى جانب أن قيمة كل من الضغوط الثلاثة E_{bm} و E_1 و E_{20} تتوقف على قيمة الفيض المغناطيسي فى الثغرة الهوائية ϕ_m ، يمكن اعتبار أن جميع هذه الضغوط تتناسب مع بعضها البعض، على اساس عدد معين من اللفات الفعالة فى كل مرحلة لجميع أنواع الملفات على المحرك . فاذا اعتبرنا أن عدد اللفات لكل مرحلة (Effective turns per phase) فى الملفات الابتدائية هى T_{e1} وفى الملفات الثانوية هى T_{e2} وفى الملفات المساعدة هى T_{ea} ، نجد أن :

$$E_1 : E_{20} : E_{bm} = T_{e1} : T_{e2} : T_{ea} \qquad (٢ - ٣٢)$$

هذا ويجب ألا ننسى فى خلال ذلك كله أن التحليل السابق ينصب على اساس شكل (١٧ - ٢) ،وهو يمثل نموذج للمحرك ذى قطبين فقط ، وعندما تتعدد الأقطاب في المحرك فان تقسيم الملفات المساعدة على المراحل الثلاثة (راجع كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية الباب الأول) يستوجب أن تتكرر مجموعات الفرش بعدد أزواج الأقطاب . فاذا كان عدد اقطاب

المحرك ستة مثلا يصبح عدد مجموعات الفرش ثمانية عشرة بدلا من ستة ، وذلك لأن طرفي كل مرحلة من المراحل الثانوية يوصل إلى ثلاث مجموعات من الفرش، التي تأخذ اوضاعا متماثلة تحت ثلاثة اقطاب متشابهة ،عند ارتكازها على المبدل . هذا إذا كان لف الملفات المساعدة من النوع الانطباقي (lap winding) . أما إذا كان لف الملفات المساعدة من النوع التموجي (Wave Winding)، فانه يكفي استخدام ستة مجموعات من الفرش، إذا كان التيار صغيرا، حيث يكون p من الملفات الواقعة تحت الأقطاب المتشابهة متصلا على التوالى مع كل مجموعة بطبيعة اللف التموجي نفسه (راجع كتاب هندسة الآلات الكهربية في اللف التموجي البسيط). أما إذا كان التيار كبيرا ، بحيث يستوجب وجود عدد من المسارات المتوازية ، فان عـدد مجموعات الفرش يتكرر p مرة كما في حالة اللف الانطباقي سواء بسواء .

مثال محلول (١) :

an 8 pole , 50 Hz schrage motor has at standstill a stator Voltage of 52 V/phase and a maximum Voltage on commutator of 30 V . Find the highest and lowest no load speed .

$$E_{20} = 52 \text{ V} , \; E_{bm} = 30 \text{ V} , \; n_s = \frac{60 f_1}{p} = 750 \text{ r.p.m.}$$

$$n_{min} = n_s \left(1 - \frac{E_{bm}}{E_{20}}\right) = 750 \left(1 - \frac{30}{52}\right) = 317 \text{ r.p.m.}$$

$$n_{max} = n_s \left(1 + \frac{E_{bm}}{E_{20}}\right) = 750 \left(1 + \frac{30}{52}\right) = 1183 \text{ r.p.m.}$$

يلاحظ أنه لاعتبارات فنية في تصميم محركات الشراجا تكون نسبة $\frac{E_{bm}}{E_{20}}$ بحيث يتراوح تغيير السرعة عادة ما بين ٥٠٪ و ١٥٠٪ من سرعه التزامن .

مثال محلول (٢) :

A 12 pole 50 Hz induction motor With 6 slip rings has a standstill rotor voltage of 600 V/phase. Together With a rotary converter and a motor generator, it forms a Scherbius cascade. The motor generator, consists of a D. C. motor with a maximum e. m. f. of 550 V and an alternator. Find the lowest no load speed of the induction motor.

يبين شكل (١١ – ٢) توصيلة المجموعة كما هى معطاة فى المسألة . وقد سبق أن ذكرنا أن المحول الدائر (rotary converter) يأخذ الضغط المتردد من الحلقات الانزلاقية للمحرك التأثيرى من ناحية، ويحوله إلى ضغط مستمر على الناحية الأخرى ،لكى يغذى به محرك التيار المستمر . ونضيف هنا أن نسبة التحويل تكون على النحو التالى :

$$E_{ac} = \frac{E_{dc}}{\sqrt{2}} \sin \frac{\pi}{m} \qquad (٢ – ٣٣)$$

حيث E_{ac} هو الضغط المرحلى من ناحية الحلقات الانزلاقية للمحول الدائر و E_{dc} هو الضغط المستمر من ناحية المبدل ،و m هو عدد الحلقات الانزلاقية . ويكون E_{ac} فى هذه الحالة هو نفس الضغط المأخوذ من الحلقات الانزلاقية للمحرك التأثيرى أى E_{2s} ، أى أن :

$$E_{2s} = SE_{20} = E_{ac} = \frac{E_{dc}}{\sqrt{2}} \sin \frac{\pi}{6} \qquad (٢ – ٣٤)$$

وهذا يعنى أنه بالنسبة لأقل سرعة ممكنة (قيمة النهاية الصغرى للسرعة) فى المحرك التأثيرى ، نحصل على أكبر قيمة للانزلاق S ، وهى التى تناظر أكبر قيمة للضغط المستمر E_{dc} ، الذى يغذى محرك التيار المستمر ، وتنص المسألة على أنه ٥٥٠ فولت .

$$\therefore \quad 600\ S = \frac{550}{\sqrt{2}} \times \frac{1}{2} \quad , \quad S = 0.324$$

$$n = n_s\ (1 - S)$$

$$n_{min} = \frac{60 \times 50}{6} \times 0.676 = 338\ r.p.m.$$

المولد التأثيرى : (The Indnction Generator)

عندما تزداد سرعة المحرك التأثيرى، الذى يدور بدون حمل، بوساطة آلة تستخدم لادارته فى نفس اتجاه دورانه الأصلى، تقل قيمة معامل الانزلاق S ، وبالتالى قيمة القوة الدافعــة الكهربية E_{2s} المنتجة بالتأثير فى ملفات العضو الدائر ، والتيار I_{2s} الناشىء عنها ، وترددها f_{2s} ، كلما زادت السرعة ، حتى تصل جميعها إلى قيمة الصفر عندما تصل سرعة دوران العضو الدائر n إلى سرعة التزامن n_s . فاذا زادت سرعة دوران العضو الدائر عن n_s ، تأخذ S قيما سالبة، حيث تصبح $n > n_s$. وهذا يعنى أن الفيض المغناطيسى الدائر أصبح يدور بالنسبة لملفات العضو الدائر فى اتجاه مضاد لاتجاهه القديم ، ممـا يؤدى إلى عكس اتجاه E_{2s} وبالتالى I_{2s} بالنسبة لاتجاههما الأول . وهــذا يعنى عكس القدرة بالنسبة لليذبوع ، فبعد أن كانت مسحوبة منه أصبحت محقونة فيه ، وانعكس عمل المحرك التأثيرى إلى مولد تأثيرى . وتكون الآلة التى رفعت سرعة العضو الدائر إلى ما بعد سرعة التزامن هى مصدر القدرة الميكانيكية التى يحولها المولد التأثيرى إلى قدرة كهربية يغذى بها اليذبوع .

وينبغى أن نلاحظ أن المولد التأثيرى لابد أن يكون موصلا إلى اليذبوع أصلا ، حتى يتسنى له أن يأخذ منه تيار المغطسة الذى ينشيء المجال المغناطيسى الدائر ، وهو أساس تشغيل المولد التأثيرى ، بالقياس على ما سبق شرحه فى حالة المحرك التأثيرى . ويحدد تردد هذا اليذبوع f_1 ، مع عدد أقطاب المولد

2p ، سرعة التزامن n_s التى ينبغى أن تزيد عنها سرعة دوران العضو الدائر للمولد n ، حتى يمكن تغذية الينبوع بالقدرة الفعالة المطلوبة ($n > n_s = \frac{60f_1}{p}$) . ويأخذ المولد هذه القدرة الفعالة فى شكل قدرة ميكانيكية من الآلة الميكانيكية التى تدير عضوه الدائر ، ويحولها إلى قدرة كهربية يغذى بها الينبوع . أما القدرة غير الفعالة اللازمة لتواجد المجال المغناطيسي فان المولد يأخذها من الينبوع نفسه . فاذا اعتبرنا أن تيار المغطسة هو تيار الاثارة ، على نحو مماثل لما نفعله فى آلات التيار المستمر ، نستطيع أن نقول إن المولد ذو إثارة منفصلة (separately excited) فى هذه الحالة .

ومن الواضح أن تشغيل المولد التأثيرى على النحو السابق يستلزم أن يكون عاملا معه على نفس الينبوع مولد أو مولدات متزامنة ، تتكفل بتغذيته بالقدرة غير الفعالة المتخلفة مرحليا (lagging reactive power) ، اللازمة لتزويده بتيار الاثارة .

وحينئذ تصبح هذه القدرة غير الفعالة حملا زائدا على المولدات المتزامنة ، بينما يمكن تقسيم القدرة الفعالة بين المولد التأثيرى والمولد المتزامن ، لكى يتعاونا في تغذية الحمل على النحو المطلوب ، كما سوف يتبين من المثال الآتى فيما بعد .

هذا ويمكن للمولد التأثيرى أن يغذى حملا مفردا (isolated load) ، وفى هذه الحالة يجب تزويده بوسيلة للاثارة الذاتية (self excitation) . ويكون ذلك عن طريق توصيل مكثفات على التوازى مع أطراف الملفات فى فى العضو الثابت . ويمكن التحكم فى قيمة التردد f_1 ، الذى تتحدد على أساسه سرعة التزامن n_s ، بتغيير سعة هذه المكثفات .

مثال محلول :

A synchronous generator supplying 2000 KW operates in

parallel with an induction generator supplying 1000 KW. The load has a power factor af 0.8. The induction generator has a power factor of 0.95. Find the power factor at which the synchronous machine is working.

حمل القدرة الفعالة الكلى على المولدين عبارة عن :

$$2000 + 1000 = 3000 \quad KW$$

حمل القدرة غير الفعالة المتأخرة عبارة عن :

$$\frac{3000}{co\ \phi_1} \times \sin \phi_1 = 3000 \tan \phi_1 = 3000 \tan 36.7°$$

$$= 3000 \times 0.75 = 2250 \quad KVAR$$

حيث ϕ_1 الزاوية المرحلية للحمل وتساوى $\cos^{-1} 0.8 = 36.7°$. يحتاج المولد التأثيرى إلى قدرة غير فعالة متأخرة لتغذيته بتيار الاثارة وهى عبارة عن :

$$\frac{2000}{\cos \phi_{I.G.}} \sin \phi_{I.G.} = 1000 \tan (\cos^{-1} 0.95)$$

$$= 1000 \times (0.3283) = 328.8 \text{ KVAR}$$

يتعين على المولد المتزامن أن يمد كلا من المولد التأثيرى والحمل بالقدرة غير الفعالة المتأخرة التى يحتاجان إليها ، وبذلك تصبح القدرة غير الفعالة المتأخرة التى يعطيها المولد المتزامن عبارة عن :

$$2250 + 328.8 = 2578.8 \text{ KVAR}$$

ويعطى المولد المتزامن قدرة فعالة مقدارها ٢٠٠٠ كيلووات ، فيكون عاملا على معامل قدرة متأخر $\cos \phi_{S.G.}$ عبارة عن :

$$\cos \phi_{S.G.} = \cos\left(\tan^{-1} \frac{2578.8}{2000}\right) = 0.613$$

لم يجد المولد التأثيرى مجالا للعمل بالمقارنة مع الامتيازات الكثيرة التى نحصل عليها من استخدام المولد المتزامن ، ولذلك ظل مجال استخدامه محدودا جدا ، ويكاد يكون مقصورا على ناحية البحث العلمى فقط . هـذا على الرغم من بعض المزايا الخاصة التي يمكن أن نحصل عليها من استخدام المولد التأثيري ، حيث أن الأجهزة المساعدة التى نحتاج إليها تكون أقل مما نحتاج إليه فى حالة المولد المتزامن ، كمـا أن تشغيل المولدات التأثيرية على التوازى يمكن أن يتم عند أى تردد ، وبدون خوف من حدوث تأرجح ، إلى جانب أن تغـيرات السرعة الناتجة عن الآلة التى تدير المولد تكون غير ذات أهمية مع هذا النوع من المولدات . ومن المزايا الهامة للمولد التأثيرى أن الاثارة تنهار عند حدوث دائرة قصر ، وهذا يعنى أن الضغط المتولد ينهار أيضا ، وكذلك قدرة المخرج ، ممـا يعطى المولد خاصية الحماية الذاتية . ولا ننسى فى هذا المجال ما يمكن أن يتمتع به المولد المتأثيرى من صلابة وقدرة على الاحتمال عندما يكون عضوه الدائر ذا قفص سنجابى .

وأهم ما يعيب المولد التأثيرى ، وهو ما حدد مجال استخداماته حتى الآن ، الحاجة إلى تشغيله على ينبوع تغذيه مولدات متزامنة ، تتكفل بتزويده بالقدرة غير الفعالة المتأخرة ، كما سبقت الاشارة إليه ، وكذلك معامل قدرته المنخفضه .

هذا وتكون الآلة التأثيرية (محرك تأثيرى) ، الموصلة إلى الينبوع المناسب ، جاهزة للتشغيل كمحرك أو كمولد تأثيرى على حسب ما إذا كان معامل الانزلاق موجبا (سرعة العضو الدائر أقل من سرعة المجال المغناطيسي فى نفس الاتجاه) ، أو كان معامل الانزلاق سالبا (سرعة العضو الدائر اكبر من سرعـة المجال المغناطيسي فى نفس الإتجاه بفعل آلة محركة ترفع السرعة بطبيعة الحـال) . ويستفاد من هذه الخاصية في المحركات التأثيرية العاملة مع الاوناش عند انزال

الأحمال ، حيث تتحدد السرعة آليا بقيمة أعلى قليلا من سرعة التزامن عندما يصبح المحرك التأثيري عاملا كمولد . وتحدث نفس هذه الظاهرة مع القارات التي تسير بالمحركات التأثيرية ، فتتحدد سرعتها على نحو مماثل عند هبوطها على المنحدرات .

مثال محلول :

An induction generator having a synhronous speed of750r.p.m. is driven at 300 r.p.m., and, with the rotor short circuited, the stator output is 9KW. Determine (a) the rotor copper loss (b) the rotor resistance per phase, given that the Voltage across slip-rings at stand still equals 260 V. Neglect rotor reactance. (c) By the addition of external resistance in the rotor circuit the stator output is reduced to 4 KW. Determine the value of the external resistance inserted per phase.

تستخدم مع المولد التأثيري نفس علاقات القدرة ومعامل الانزلاق التى سبق استخدامها مع المحرك التأثيري ، مع مراعاة أن معامل الانزلاق هنا تسبقه اشارة سالبة، وأن اتجاه سريان القدرة من عمود الإدارة إلى الينبوع . وفى هذه الحالة نجد أن قدرة المدخل P_i هى قدرة ميكانيكية تعطى على عمود الإدارة. وباستخلاص قدرة المفقودات الميكانيكية P_f منها تبقى القدرة الميكانيكية النافعة P_m حيث :

$$P_m = P_i - P_f \qquad (٢-٣٥)$$

وتكون العلاقة بين P_m ومفقودات العضو الدائر النحاسية P_{cu2} وقدرة الثغرة الهوائية P_g ، مع مراعاة الإشارة السالبة لمعامل الانزلاق ، هى :

$$P_g : P_m : P_{cu2} = 1 : (1 + S) : S \qquad (٢-٣٦)$$

حيث أن مجموع P_g و P_{cu2} عبارة عن P_m فى هذه الحالة ، لأن P_m هى التى تزودنا بها معا . وبانتقاص مفقودات العضو الثابت P_{st} من قدرة الثغرة الهوائية ، التى تأتى من العضو الدائر فى هذه الحالة ، نحصل على قدرة الخرج P_0 التى يغذى بها المولد الينبوع .

$$P_0 = P_2 = P_g - P_{st}$$

(ا) ونظرا لأن P_{st} ليست معطاة فى المسألة فاننا نهملها ، ونعتبر أن :

$$P_0 = P_g = 9000 \text{ W}$$

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{750 - 800}{750} = -0.0667$$

$$P_{cu2} = s\,P_g = \frac{5}{75} \times 9000 \text{ W} = 600 \text{ W}$$

(ب) نستخدم نفس العلاقة التى حصلنا عليها فى المحرك التأثيرى لإيجاد التيار فى ملفات العضو الدائر ، فنجد أن :

$$I_{2s} = \frac{E_{20}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + x^2_{20}}}$$

ويمكن اهمال X_{20} بالنسبة لـ $\frac{R_2}{s}$ كما هو منصوص عليه فى المسألة ،

$$I_{2s}\,R_2 = S\,E_{20} \quad , \quad I^2_{2s} = \frac{S^2\,E^2_{20}}{R^2_2}$$

$$600 = P_{cu2} = 3\,I^2_{2s}R_2 \,,\; I^2_{2s} = \frac{600}{3\,R_2}$$

$$\therefore R_2 = \frac{3\,S^2\,E^2_{20}}{600} = \frac{3 \times (0.0667)^2 \times (260/\sqrt{3})^2}{600}$$

$$= 0.5 \text{ ohm}$$

(ح) ويلاحظ أن سرعة الآلة المحركة ٨٠٠ لفـة في الدقيقة لاعلاقـة لها بدخول أو خروج مقاومة فى العضو الدائر ، فهى تظـل ثابتة ، وكذلك سرعـة المجال المغناطيسي n_s . فعند اضافـة مقاومات في ملفات العضو الدائر لاتتغير قيمة معامــل الإنزلاق S ، ولكن تتغير مفقودات العضو الدائر النحاسية (نتيجة لتغيير قيمتى المقاومة و I_{2s}) ، وكذلك القدرة P_m ، التي تقل قيمتها فتقل بالتالى قدرة المخرج إلى الينبوع . وفي هذه الحالة نحصل على العلاقات الآتية ، بفرض أن المقاومة التى اضيفت قيمتها R_a لكل مرحلة :

$$P_0 = P_g = 4000 = \frac{3 I^2_{2s} (R_2 + R_a)}{S}$$

$$I^2_{2s} = \frac{4000 S}{3 (R_2 + R_a)} \quad , \quad I^2_{2s} = \frac{S^2 E^2_{20}}{(R_2 + R_a)^2}$$

$$\therefore (R_2 + R_a) = \frac{3 S E^2_{20}}{4000} = \frac{0.0667 \times (260 / \sqrt{3})^2}{4000}$$

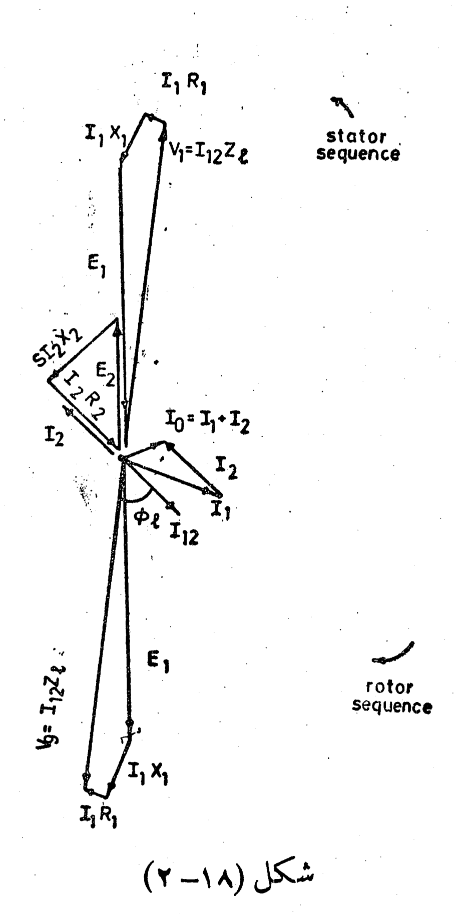
$$= 1.125 \text{ ohm}$$

$$R_a = (1.125 - 0.5) = 0.625 \text{ ohm}$$

يبين لنا المثال السابق خاصية هامة للمولد التأثيرى ، وهى احتمال تغيير قدرة المخرج المعطاة للينبوع، عن طريق تغيير المقاومة المرحلية فى ملفات العضو الدائر. ويمكن الاستفادة من هذه الخاصية فى المولدات ذات الحلقات الإنزلاقية فقط بطبيعة الحال . ويكون ازدياد قيمة المقاومة في ملفات العضو الدائر عاملا على نقص قدرة المخرج للينبوع . ويلاحظ أن كلا من قدرة الثغرة الهوائية ومفقودات النحاس فى العضو الدائر تنخفض فى هـذه الحالة أيضا ، وذلك حتي يظل التناسب بين القدرات الثلاث متساويا مع التناسب بين S : (S+1) : 1 ، الذى يظل ثابتا بثبوت قيمة S .

نختتم هـــذا الجزء الخاص بالمولد التأثيرى برسم مخطط المتجهات، شكل

(١٨ ـ ٢) ، على نفس المنوال الذى تم به رسم مخططات المتجهات للمحرك التأثيرى عند تغيير سرعته بالضغط المحقون [الأشكال من (١٢ ـ ٢) إلى (١٥ ـ ٢)] . وفى هذه الحالة يمكن التعويض عن ضغط الينبوع V_1 فى



شكل (١٨ ـ ٢)

المعادلة (٢٠ ـ ٢) بهبوط الضغط فى الحمل $I_{12} Z_l$ ، لكى نحصل على المعادلة الخاصة بالمولد التأثيرى على النحو التالى :

$$E_1 + I_{12} Z_l + I_1 R_1 + I_1 X_1 = 0 \qquad (٢ - ٣٧)$$

يكون الضغـط المتولد على طرفى الآلة V_g مساويا لـ $(-I_{12}Z_l)$ ، وبالتعويض بهذه العلاقة فى المعادلة (٣٢ ـ ٢) نجد أن :

$$V_g = E_1 + I_1 R_1 + I_1 X_1 \quad \dots \dots \dots \dots \quad (٢ - ٣٨)$$

يكون الينبوع الذى يمـد الآلة بتيار اللاحمل I_0 متصلا على التوازى مع الحمـل ، ويكون ضغطه V_1 مساويا لهبوط الضغط فى الحمل $I_{12}\ Z_l$ ، كما سبق ذكره ، بحيث يمكننا تعديل المعادلة (٣٢ ـ ٢) على النحو التالى :

$$V_1 + I_1 X_1 + I_1 R_1 + E_1 = 0 \quad \dots \dots \quad (٢ - ٣٩)$$

يكون تيار اللاحمل I_0 ، الذى يتزود به المولد من الينبوع ، متأخرا على ضغط الينبوع V_1 ، ويعمل المجال المغناطيسى على توليد القوة الدافعة الكهربية E_1 فى ملفات العضو الثابت ، والقوة الدافعة الكهربية E_2 فى ملفـات العضو الدائر . وعندما يكون العضو الدائر مدارا بسرعة أعلى من سرعة التزامن، فان اتجاه E_2 يكون فى عكس اتجاه E_1 ، كما أن التعاقب المرحلى فى دائرة العضوالدائر يكون مضاداً لإتجاهه في ملفات العضو الثابت . ونظرا لأن دائرةالعضو الدائر حثية بطبيعتها (inductive circuit) فان I_2 سوف يكون متأخرا علي E_2 ، مع مراعاة التعاقب المرحلي المعكوس في العضو الدائر . ويكون I_{12} ، وهو تيار الحمل فى هذه الحالة ، فى عكس اتجاه I_2 .

نجد جميع الحقائق السابقة مبينة فى مخطط المتجهات فىشكل (١٨ ـ ٢)، الذى يتضح منه أن تيار الحمل I_{12} متقدم على الضغط المتولد V_g . وهذا يعنى أن المولد التأثيرى قادر على تغذية الحمل السعوي (Capacitive load) فقط (على أساس التعاقب المرحلى فى دائرة العضو الثابت) ، وهـذا يرجع إلى طبيعة دائرة العضو الدائر الحثية ، كما سبق أن ذكرنا ، فلا يمكن أن يمر فيها إلا تيار حثى .

الباب الثالث

بعض المشاكل الخاصة بتشغيل المحركات التأثيرية ثلاثية المراحل

(Some problems related to the operation of 3-phase induction motors)

تنشأ مشاكل متعددة بطبيعة الحال ، عند تشغيل أى جهاز ، لأسباب قد تتعلق بظروف التشغيل ، أو بحكم طبيعة تصميم هذا الجهاز . ونحن لانستطيع حصر جميع المشاكل ، واقتراح الحلول الناجحة لها ، بالنسبة للمحرك التأثيرى ثلاثى المراحل ، وخصوصا ما يتعلق منها بظروف التشغيل ، التى يمكن أن تختلف باختلاف المكان والزمان . ولكننا نستطيع التركيز على بعض المشاكل ، التي نتوقع أن تثور بناء على خواص معروفة للمحرك ، تنشأ إذا لم تتخذ الاحتياطات المناسبة فى تصميمه ، أو عند تشغيله ، فنحدد العلة ، ثم نقترح لها الدواء . وفيما يلى نفعل ذلك على قدر الإمكان .

(١ – ٣) المشاكل الخاصة بعزم دوران البدء للمحرك :

(Problems related to the starting torque of the motor)

بمراجعة المعادلة (١–٢) نجد أن عزم دوران البدء للمحرك بالنسبة لعزم دوران الحمل الكامل له يتناسب مع $\left(\frac{I_{st}}{I_{f1}}\right)^2$ ، وكذلك مع S_{f1} . فاذا افترضنا أن نسبة تيار البدء فى المحرك إلى تيار الحمل الكامل تتراوح بين ٣ و ٦ فان المحرك يمكنه أن يعطى عزم دوران الحمل الكامل إذا كانت قيمه معامل الانزلاق تتراوح مابين ١١٪ ، ٤٪ على الترتيب . ولايمكن تصميم المحرك بهذه القيم المرتفعة لمعامل الإنزلاق عند الحمل الكامل ، حيث يؤدى ذلك إلى خفض قيمة معامل جودته خفضاً كبيراً ، إلا فى حالة المحركات الصغيرة ذات القفص السنجابى ، التي يمكن أن تصل قيمة معامل الإنزلاق فيها عند الحمل الكامل إلي ٥٪ (أقل من خمسة أحصنة) .

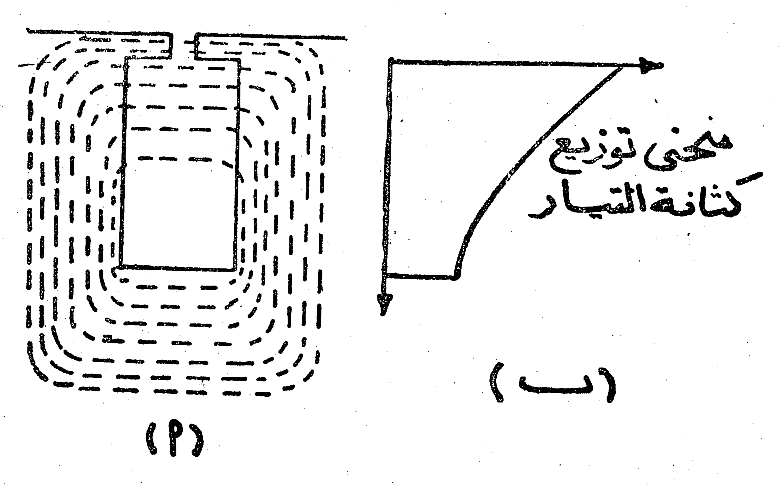
وقد يكون تشغيل المحرك بحيث يدار أولا بدون حمل ، ثم يزداد الحمل على عمود الإدارة تدريجيا حتى يبلغ حده الكامل ،و في هذه الحالة لاتثور أية مشاكل من ناحية عزم دوران البدء للمحرك ، حيث لانحتاج إلا إلى عزم دوران صغير لمواجهة المفقودات ، وهو مايكون المحرك قادراً على بذله دون الحاجة إلى ترتيبات خاصة فى أغلب الأحيان . أما إذا كان من اللازم إدارة المحرك والحمل الكامل موجود على عمود الإدارة ، فلا بد وأن يكون عزم دوران البدء للمحرك أكبر من عزم دوران الحمل الكامل ، بما يساوى مجموع عزمى دوران التعجيل ومواجهـة المفقودات ، وهو عزم دوران كبير على أية حال . وبمراجعة شكل منحنى عزم دوران المحرك مع السرعة ، أو معامل الإنزلاق، كما أوردناه فى الباب الأول ، نجد أن قيمة عزم دورانالبدء للمحرك ($S = 1$ أو $n = 0$) تزداد بزيادة قيمـــة المقاومة المرحلية ، فى ملفات العضو الدائر ، بالنسبة لقيمة الممانعة الحثية لهذه الملفات ، بحيث أننا نستطيع الحصول على قيمة النهاية العظمى لعزم الدوران للمحرك عند البدء بجعل القيمتين متساويتين . وهذا يعنى أننا نستطيع التحكم فى مقدار عزم دوران البدء للمحرك ، كما نشاء ، بوضع مقاومة ثلاثية المراحل ، متغيرة القيمة فى الحلقات الثانوية للمحرك .وهومايحدث بالنسبة للمحرك ذىالحلقات الانزلاقية ، إذا استدعى الحال ، اما بالنسبة للمحـرك ذى القفص السنجابى فان الأمر قد يحتاج إلى ترتيب خاص . لذلك توجد محركات ذات قفص سنجابى من نوع معين توصف بأنهـا محركات ذات عزم دوران بدء مرتفع (motors with high starting torque) ، نوجز شرح أنواعها فى البندين التاليين .

(٢ ـ٣) المحركات ذات قضبان العضو الدائر العميقة :

(motors with deep rotor bars)

إن الأساس فى هذا الموضوع هو الحصول على ملفات قفص سنجابى ، على العضو الدائر ،مكونةمنذى الحلقات الانزلاقيه ، اذا استدعى الحال، أما بالنسبه للمحرك من قضبان مقفلة ، بحيث تكون مقاومتها كبيرة عند البدء ، لـكى تعطى عزم دوران بدء مرتفع ، ثم تقل هذه المقاومة تلقائيا ،

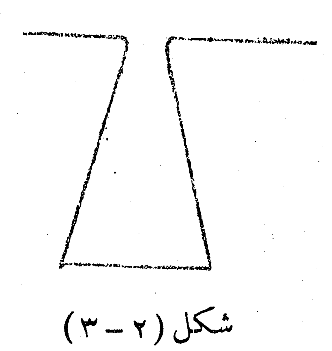
عندما يصبح المحرك دائراً بالحمل الكامل بسرعة قريبة من سرعة التزامن ، بحيث لا يضار معامل جودة المحرك ، نتيجة لوجود المقاومة الكبيرة فى أثناء وجود تيار الحمل . ونحن نلجأ فى هذا الصدد إلى الإستفادة من ناحية معينة تنفرد بها ملفات العضو الدائر فى المحرك ، وهى تغير قيمة ممانعة التسرب المرحلية تغيراً كبيراً جداً ، من X_{20} عند البدء من السكون إلى $X_{2s} = SX_{20}$ عند الحمل الكامل بمعامل الإنزلاق s ، وذلك بسبب تغير التردد بالنسبة للعضو الدائر من f_1 إلى $f_{2s} = sf_1$ عند نفس معامل الإنزلاق s . إن ممانعة التسرب هذه تنشأ عن وجود خطوط قوى مغناطيسيه متسربة تحيط بالملفات الثانوية ، ولا تتشابك مع الملفات الابتدائية (صفحة ٣١٠ كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربائية)، ويبين شكل (١ ـ ٣) مسار هذه الخطوط فى جزء (الملفات أو هو قضيب فى هذه الحالة) الواقع فى المجرى . ويمكننا القول بأن إرتفاع قيمة التردد فى البدء



شكل (١ ـ ٣) ا ، ب

يمكن أن يؤخذ في الحسبان ، لإعطاء ممانعة تسرب مكافئة عالية ، بزيادة عدد خطوط القوى المتسربة المتشابكة مع الأجزاء السفلى من المقطع ، كما فى شكل (١ـ٣) ا ، وأن إنخفاض قيمة التردد عند الحمل الكامل ينعكس على قيمة ممانعة التسرب المنخفضة ، بخفض عدد الخطوط المتسربة .

وهذا يعنى أننا نلجأ إلى الإستفادة من الظاهرة القشرية (skin effect)، التى تصاحب زيادة التردد عند البـدء ، بأن نقرر أن التيار المرحلى فى الملفات الثانوية سوف يضطر إلى المرور عبر الأجزاء العليا من مساحة مقطع القضبان المكونة لهذه الملفات عند البدء ، وزيادة كثافة التيار فيها عن الأجزاء السفلى ، شكل (١ ـ ٣) ب ، مما يؤدى إلى زيادة قيمـة المقاومة المرحلية المكافئة لهذه لهذه القضبان . ثم يمكن لهذا التيار نفسه أن يمر عبر المساحة كلها عندما ينخفض التردد فى حالة الحمل الكامل ، بحيث تنخفض قيمة المقاومة المرحلية المكافئة للقضبان انخفاضا ملحوظا . فاذا عمدنا إلى تقليل مساحة الأجزاء العليا من مقطع القضبان كما في شكل (٢ ـ ٣) ، مع زيادة عمق القضيب، لنفس



شكل (٢ ـ ٣)

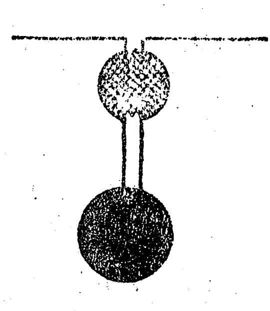
الغرض المطلوب ، فاننا نحصل على مقاومة مرحلية مكافئة للقضبان تزيد زيادة ملحوظة فى البدء عنها عند الحمل الكامل .

وتوصف مثل هذه المحركات بانها ذات قضبان عضو دائر عميقة ، ثم ذات عزم دوران بدء مرتفع بناء على ذلك . ونجد فى الحيـاة العملية أشكالا مختلفة لهذه القضبان وصناعات متباينة تقوم على نفس الأساس لإستيفاء الغرض المطلوب .

(٣ ـ ٣) المحركات مزدوجة القفص السنجابى :

(Double squirrel cage motors)

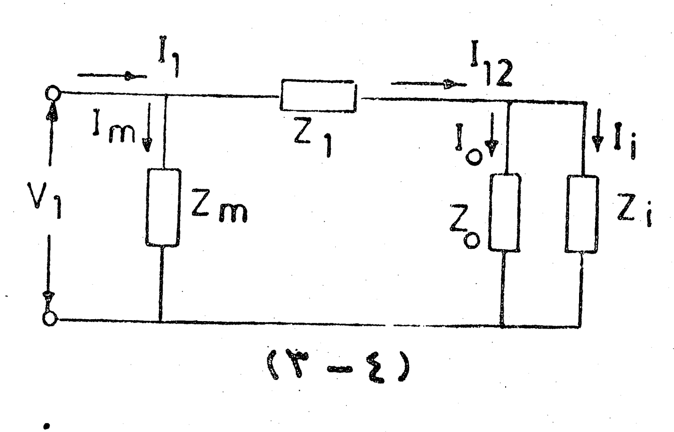
تزود بعض المحركات بقفص سنجابى مزدوج على العضو الدائر، أحدهما (الخارجى) ذو مقاومة مرحلية مكافئة للقضبان مرتفعة القيمة ، والثانى (الداخلى) ذو مقاومة مرحلية مكافئه للقضبان منخفضة القيمة بالنسبة للأول، ويعتمد هذا أساساً على جعل القضبان في القفص الخارجى ذات مقطع مساحته أقل بصورة ملحوظة من مقطع القضبان فى القفص الداخلى ، كما يتبين من من شكل (٣ ـ ٣) .



شكل (٣ ـ ٣)

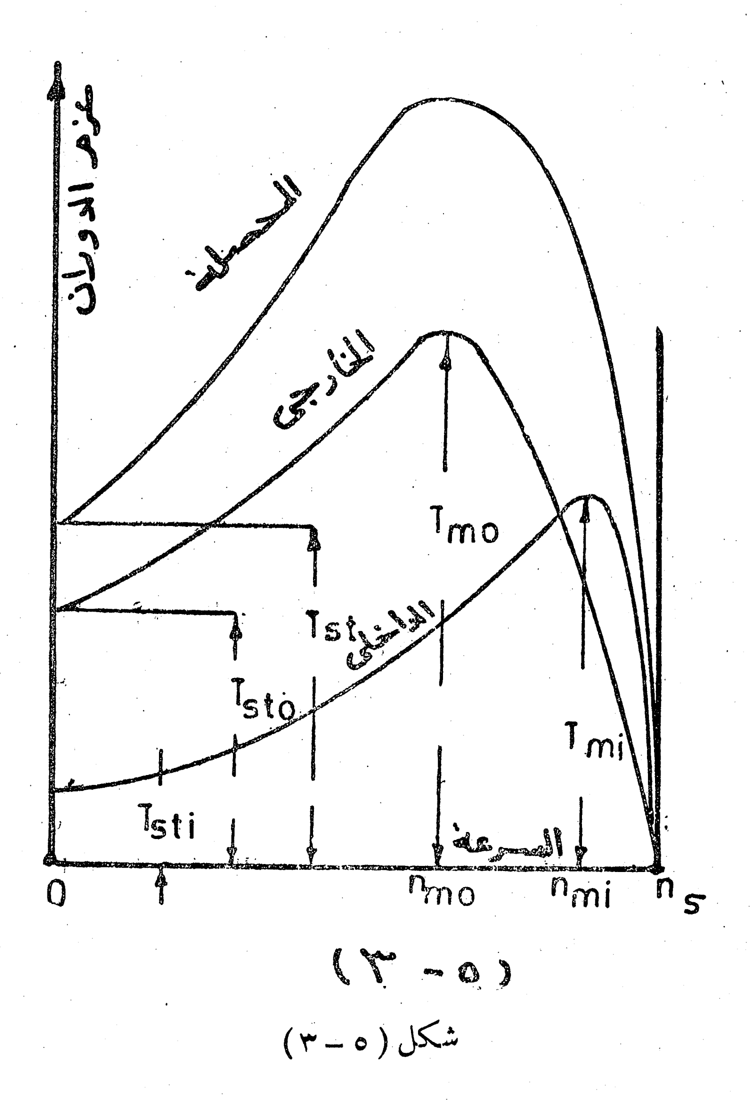
ومن ناحية أخرى يستفاد من الظاهرة القشرية، بنفس الطريقة التى استفدنا بها فى الحالة السابقة ، للحصول على ممانعة تسرب حثية كبيرة ،للقفص الداخلى عند البدء ، تتجاوز قيمتها كثيراً قيمة مقاومة البدء المرتفعة للقفص الخارجى، بحيث تصبح قيمة معاوقة القفص الداخلى كبيرة بالنسبة لقيمة معاوقة القفص الخارجى ، فيمر الجزء الأكبر من تيار البدء فى القفص الخارجى ، ونحصل على عزم دوران بدء كلى مرتفع للمحرك . أما عند الحمل الكامل ، وقد انخفض معامل الإنزلاق بدرجة كبيرة عما كان عليـــه فى البدء ، فان قيمة ممانعة التسرب للقفص الداخلى تتضاءل بالنسبة لقيمة المقاومة المرحلية للقفص

الخارجى ، فتصبح قيمة معاوقة القفص الخارجى مرتفعة بالنسبة لقيمة معاوقة القفص الداخلى ، مما يدفع بمرور الجزء الأكبر من التيار فى القفص الداخلى ذى المقاومة المرحلية المكافئة المنخفضة ، فلا يتأثر معامل جودة المحرك تأثراً ملحوظاً بوجود القفص الخارجى ، الذى يساعد على إعطاء عزم دوران بدء مرتفع للمحرك . وفي الواقع أنه يمكننا ، على هذا الأساس ، إعتبار القفصين مكافئين لدائرتي ملفات متصلين مرحليا على التوازى ، وينقسم بينهما



شكل (٤ – ٣)

التيار الثانوي المرحلي بنسبة عكسية لقيمتي معاوقتيهما ، ويكون عزم الدوران الكلى للمحرك عبارة عن مجموع عزمي الدوران الذى يعطيه كل قفص على حدة. فاذا فرضنا أن معاوقه القفص الخارجى المرحلية المكافئة فى حالة السكون هى $Z_o = R_o + jX_o$ ، ومعاوقه القفص الداخلى المرحليه المكافئه فى حالة السكون أيضاً هى $Z_i = R_i + jX_i$ ، منسوبتان إلى الملفات الإبتدائية ، ومعاوقة الملفات الإبتدائيـة المرحلية هى $Z_1 = R_1 + jX_1$ ، فاننا نحصل على دائرة مرحليـة مكافئة تقريبية للمحرك عند أى معامل إنزلاق S ، منسوبة إلى الملفات الإبتدائية ، كما هو مبين في شكل (٤ – ٣) . فاذا أخذنا بقاعدة التجميع (superposition)



شكل (٥ – ٣)

theorem) ، فى هذه الحالة ، فاننا نستطيع التعامل مع كل قفص على إنفراد ، على انه ملفات ثانوية قائمة بذاتها لنفس الملفات الإبتدائية ، وفى كل مرة نحصل على منحنى عزم دوران مع معامل الإنزلاق مستقل ، تتوقف قيمة النهاية العظمى وموقعها فيه ، وعزم دوران البدء له ، على قيمتى ممانعة التسرب المرحلية والمقاومة المرحلية ، والنسبة بينهما ، كما سبق بيانه في الباب

الأول . ثم نحصل على منحنى عزم الدوران الكلى للمحرك ، مــع معامل الإنزلاق ، بتجميع عزمى الدوران للقفصين معاً ، عند معامل الإنزلاق ، كما هو مبين فى شكل (٥ — ٣) .ويلاحظ أن إختلاف قيمتى النهاية العظمى فى منحنى عزم الدوران للقفصين، وتباين موقعها ،هو الذى يعطى المحرك الخاصية المطلوبة ، وهى إعطاء عزم دوران بدء مرتفع . وعلى حسب ثوابت القفصين المفروضــة ، وما سبــق بيانه في الباب الأول ، نجد أن النسبة

$\alpha_i = \frac{R_i}{X_i}$ تساوى معامل الإنزلاق S_{mi} الذى يحدد قيمة النهاية العظمى لعزم الدوران فى القفص الداخلى ، وأن النسبة $\alpha_o = \frac{R_o}{X_o}$ تســاوى معامل الإنزلاق S_{mo} الذى تقــع عنده النهــاية العظمى لعزم الدوران فى القفص الخارجى ، وهما مختلفان إختلافا واضحاً . كما أننا نتوقع أن تكون النسبة بين قيمتىالنهاية العظمى لعزمىالدورانفىالقفصين الداخلى والخارجى T_{mi}/T_{mo} هى نسبة عكسية لمانعتى تسربها X_o / X_i .

a 3-phase; 6 pole double cage induction motor, for 220 V in delta connection, 50 HZ has at standstill the following roto impedances referred to stator : inner cage (4 + 50 j) ohms, and outer cage (8 + 25 j) ohms. Neglecting the impedance of the stator winding, find the ratio of the starting torque to the full load torque at 3% slip .

يبين شكل (٥—٣) الدائرة المكافئة لمثل هذا المحرك ويكون فى حالتنا هذه:

$$R_o = 8 \ , \ X_o = 25 \ . \ R_i = 4 \ , \ X_i = 50 \ \text{ohms} \ ,$$

$$n_s = \frac{50 \times 60}{3} = 1000 \ \text{r.p.m.}$$

عند بدء الحركة من السكون ، أى عند 1 = S ، ومع إهمال معاوقة العضو الثابت ، نجد أن :

تيار البدء في القفص الخارجى :

$$I_{ost} \simeq \frac{220}{\sqrt{8^2 + 25^2}} \simeq 8.36 \text{ A}$$

قدرة الثغرة الهوائية للقفص الخارجى :

$$P_{gost} = 3 I_o^2 \frac{R_o}{S} = 3 \times (8.36)^2 \times 8 = 1680 \text{ W}$$

تيار البدء في القفص الداخلى :

$$I_{ist} \simeq \frac{220}{\sqrt{4^2 + 50^2}} \simeq 4.38 \text{ A}$$

قدرة الثغرة الهوائيــة للقفص الداخلى :

$$P_{gist} = I_i^2 \frac{R_i}{S} = 3 \times (4.38)^2 \times 4 = 231 \text{ W}$$

قدرة الثغرة الهوائيــة للقفصين معا عند البدء هى مجموع القدرتين أى أن :

$$P_{gst} = 1680 + 231 = 1911 \text{ W}$$

ويكون عزم دوران البدء للمحرك هو :

$$T_{st} = \frac{P_{gst}}{2 \pi \frac{n_s}{60} \times 9.81} = 0.973 \frac{P_{gst}}{n_s}$$

$$= 0.973 \times \frac{1191}{1000} = 1.86 \text{ Kg.m}$$

ويساهم القفص الخارجى فى هذه القيمة بما يساوى

$$(0.973 \times \frac{1680}{1000} =) \ 1.63 \ Kg.m.$$

كما يساهم القفص الداخلى فى هذه القيمة بما يساوى

$$(0.973 \times \frac{231}{1000}) \ 0.22 \ Kg.m$$

ويلاحظ أن ارتفاع قيمة عزم دوران البدء ، الذى يعطيه القفص الخارجى ، إرتفاعا ملحوظا عن ذلك الذى يعطيه القفص الداخلى فى عزم دوران البدء الكلى، ناشىء عن مؤثرين يعملان فى آن واحد ، وهما إرتفاع قيمة معاوقه القفص الداخلى بالنسبة للقفص الخارجى عند البدء ، ثم زيادة النسبة بين قيمتى ممانعة التسرب والمقاومة المرحلية فى القفص الداخلى عنها فى القفص الخارجى، بسبب إرتفاع قيمة المقاومة وإنخفاض قيمة الممانعة فى هذا الأخير زيادة ملحوظة عند البدء

عند معامل الإنزلاق $S = 0.03$ ، أى عند الحمل الكامل تقريبا نجد أن

تيار الحمل فى القفص الخارجى

$$I_{o1} \simeq \frac{220}{\sqrt{25^2 + \left(\frac{8}{0.03}\right)^2}} \simeq 0.824 \ A$$

قدرة الثغرة الهوائيه للقفص الخارجى .

$$P_{go1} = 3I_{o1}^2 \frac{R_o}{S} = 3 \times (0.824)^2 \times \frac{8}{0.03} = 542 \ W$$

تيار الحمل فى القفص الداخلى :

$$I_{i1} \simeq \frac{220}{\sqrt{50^2 + \left(\frac{4}{0.03}\right)^2}} \simeq 1.514 \text{ Amps}$$

قدرة الثغرة الهوائية للقفص الداخلى :

$$P_{gi1} = 3\, I^2_{i1} \frac{R_i}{S} = 3 \times (1.544)^2 \times \frac{4}{0.03}$$

$$= 952 \text{ W}$$

قدرة الثغرة الهوائية للقفصين معا عند الحمل الكامل :

$$P_{g1} = 542 + 952 = 1494 \text{ W}$$

ويكون عزم الحمل الكامل للمحرك هو :

$$T_1 = 0.973 \frac{P_{g1}}{n_s} = 0.973 \times \frac{1494}{1000} = 1.456 \text{ K}_{g.m.}$$

النسبة المطلوبة :

$$\frac{T_{st}}{T_l} = \frac{1.86}{1.456} = 1.28$$

وهذا يعطي الفرصة لبدء المحرك والحمل الكامل موجود على عمود الإدارة

(٤ – ٣) ظاهرة الحبو : Crawling phenomena

سبق أن بينا فى الباب الثالث من كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية، فى البند الخاص بالتوافقيات الفراغية للفات المنتج (صفحة ١٠٨–١١٧)، أنه بالنسبة للتوافقيات الفراغيـة في منحنى التوزيع الفراغي (أو المنحنى

الفراغى) للقوة الدافعة المغناطيسية للملفات المنتج ثلاثية المراحل ، عندما تمر فيها تيارات ثلاثية المراحل ، كما هو الحال بالنسبة للملفات الإبتدائية للمحرك التأثيرى ثلاثى المراحل ، يكون الوضع على النحو التالى:

ا — توجد توافقية فراغية أساسية واحدة فقط ، وهى توافقية أمامية تدور بسرعة التزامن n_s فى اتجاه دوران العضو الدائر ، وهذا هو المجال المغناطيسي الدائر الذى بنينا كل النظريات الأساسية للمحرك على أساس تواجده بتأثيراته المختلفة .

ب — توجد توافقيات عالية أمامية درجاتها ($6\ m + 1$) ، حيث m عدد صحيح موجب، وهى تدور جميعا فى اتجاه دوران العضو الدائر بالسرعات $\frac{n_s}{6\ m + 1}$ ، وتمثل كل منها مجالا مغناطيسيادائرا يمكن أن يعطى تأثيرات مماثلة لتلك التى يعطيها المجال المغناطيسي الدائر الأساسى ، ولكن هذه التأثيرات تتفاوت من مجال إلى آخر على حسب الإتساع .

حـ — توجد توافقيات عالية خلفية درجاتها ($6\ m - 1$) تدور فى عكس اتجاه العضو الدائر بالسرعات $\frac{n_s}{6m - 1}$

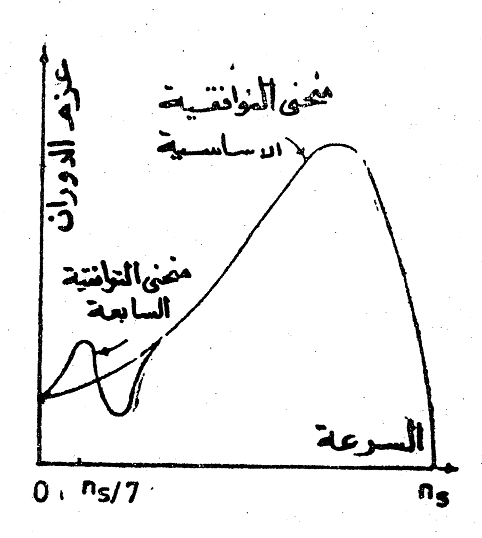
وجميع هذه التوافقيات تمثلها المعادلة (١٠ – ٣) فى الكتاب المذكور ، وهى:

$$Y = f(\Psi) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{T_{ph}}{p} I \sum_{\lambda = 1 \ldots 7,5 \ldots 13, 11 \ldots} \pm \frac{k_{w\lambda}}{\lambda} \cos\left(\omega t \pm \lambda \frac{\pi x}{\tau_p}\right) \qquad (٣ - ١)$$

يمكن لكل توافقية عالية أمامية درجتها ($6\ m + 1$) ، حيث m عدد صحيح موجب ، أن تعطى المحرك عزم دوران يشبه فى منحناه منحنى عزم

الدوران الأساسي للمحرك مع معامل الإنزلاق ، ويختلف هذا المنحنى عن المنحنى الأصلي في حجمه فقط ، حيث تكون قيمة النهاية العظمى له أصغر من قيمة النهاية العظمى لعزم الدوران الأصلي ، بما يتناسب مع صغر اتساع التوافقية العالية . كما أن هـذا المنحني المماثل بأكمله يشغل مسافة تتناسب مع $\frac{n_s}{m}$ على محور السرعة (أو معامل الإنزلاق) ، نظرا لأن سرعة المجال المؤثر هي $\frac{n_s}{m}$ بدلا من n_s في المجال الأساسي . ونحصل على منحنى عزم الدوران الفعلي للمحرك مع معامل الإنزلاق بتجميع عزوم الدوران الناشئة عن تأثير المجال المغناطيسي للتوافقية الأساسية ، وتأثيرات المجالات المغناطيسية للتوافقيات العاليـة عند قيم معامل الإنزلاق المختلفة . ونظرا لأن اتساع التوافقيات العالية ، وبالتـالى تأثيرات المجالات الناشئة عنها ، تقل بشكل ملحوظ كلما ارتفعت درجتها ، على حسب المعادلة (١ ــ ٣) ، فاننا نستطيع أن نهمل تأثير جميع التوافقيات العالية ، فيما عدا التوافقية التي درجتها $(6\ m + 1)$ ، بأخـذ m أصغر ما يمكن أي $m = 1$ ، وهي التوافقية السابعة . وفي هـذه الحالة نحصل على منحنى عزم دوران كلي للمحرك ، ناشيء عن تأثير كل من مجال التوافقية الأساسية ومجال التوافقية السابعة معا ، كما هو مبين في شكل (٦ ــ ٣) .

يلاحظ أن تجميع عزم دوران التوافقية السابعة على عزم دوران التوافقية الأساسية يعطى منحنى عزم الدوران المحصل خاصية الإتزان عند سرعة قريبة من $\frac{n_s}{7}$ ، إلى جانب الإتزان الموجود أصلا عند سرعات أقـل قليلا من n_s كما سبق شرحه في الباب الأول . وقـد يؤدي وجود حمل على عمود الإدارة في هذه الحالة إلى جعـل المحرك يدور عند السرعة المنخفضة $\frac{n_s}{7}$ تقريبا ، حيث يمكن أن يصبح عزم الدوران المحرك وعزم دوران الحمـل في حالة اتزان ديناميكي . ويطلق على هـذه الظاهرة اسم ظاهرة الحبو ، ويمكن



(شكل ٦ ـ ٣)

القضاء عليها بالتخلص من التوافقية الفراغية السابعة ، وذلك بجعل المعامل الوترى لها يساوى صفرا ، عن طريق جعل الملفات كسرية الخطوة باتساع مقداره $\frac{6}{7}$ من الخطوة القطبية ، كما سبق شرحه فى الباب الثانى من كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية (صفحة ٥٨ ـ ٦٠)

(٥ ـ ٣) ظاهرة التماسك : (Cogging)

عندما يكون عدد مجاري العضو الثابت S_1 مساويا لعدد مجارى العضو الدائر S_2 تحدث ظاهرة التماسك ، حيث يمتنع المحرك عن بدء الدوران على الإطلاق . وعلاج هذه الحالة يكون بطبيعة الحال بجعل S_1 لايساوى S_2 بأية حال من الأحوال ، كما سيتم بيانه فى باب التصميم .

(٦ ـ ٣) اصدار الضجة : Nois eproduction

يحدث في بعض الأحيان، عندما يكون المحرك دائراً بسرعة أقل من سرعته

المعتادة ، أن تنشأ فى الحديد اهتزازات زائدة تصدر عنها ضجة تشبه عـواء متوسط الدرجة .

وظواهر الحبو والتماسك والضجيج من خصائص محركات القفص السنجابى دون غيره . والسبب الأساسى فى تميزه بهذه الخصائص عن محركات الحلقات الإنزلاقية ، أن القفص السنجابى يمكن أن تمر فيه تيارات بفعل أى توافقية من توافقيات المجال المغناطيسى فى الثغرة الهوائية ، بينما تعمل ملفات العضو الدائر فى المحرك ذى الحلقات الإنزلاقية على تقليل تأثير أية توافقية من هذه التوافقيات التى يختلف طول خطوتها عن خطوة الملف ، أى أيـة توافقية غـير الاساسية .

والحقيقة أن هذه الظواهر لايمكن تفسير أسبابها بشكل حاسم ودقيق ، وهى تعزى عادة لأشكال مختلفة من توافقيات المجـال المغناطيسى المتولدة بطريقة طفيلية (parasitic harmonic magnetic fields) ، مثل :

(ا) توافقيات المجـال التى تنشأ عن الملفات ، وتوافقيات المجـارى (slot harmonics) ، وتموجات الاسنان (tooth ripples) (راجع كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية صفحة ٧٩) .

(ب) التوافقيات الناشئة عن التشبع المغناطيسى ، وتلك التى يسببها عـدم انتظام طول الثغرة الهوائية للملفات .

(ج) التوافقيات وعدم التماثل فى ضغط الينبوع ، وكذلك المجال المتسرب عند التوصيلات الطرفية للملفات . هذا ، وتتسبب هذه المجالات المغناطيسية الطفيلية فى عمل تعديلات شكلية فى أجزاء المحرك الميكانيكية ، مثل انحناء عمود الادارة (راجع جزء التوافقيات صفحة ٦٩ كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية)

تشغيل المحرك التأثيرى ثلاثى المراحل على تردد يختلف عن تردده الأصلي :

إن الترددين الشائع استخدامها بالنسبة لينابيع القوى فى العالم باسره ، هما ٥٠و٦٠ ذبذبة فى الثانية ، فتستخدم ٥٠ ذبذبة عموما فى أوربا و ٦٠ ذبذبة عموما فى أمريكا . وقد تستخدم المحركات المصنوعة فى أوربا فى بعض البلدان التى يشيع فيها استخدام التردد ٦٠ ذبذبة فى الثانية ، كما قد تستخدم المحركات الأمريكية حيث يشيع استخدام التردد ٥٠ ذبذبة فى الثانية . ويجب فى كلتا الحالتين اتخـاذ الاحتياطات اللازمة لكى لايضار المحرك بسبب تغيير التردد الذى صنع له ،وسنبين ذلك فيمايلى بالنسبة لكل حالة على حدة .

(أولا) بالنسبة للمحركات التى تصمم على أساس تردد ٦٠ ذبذبـة فى الثانية وتستخدم على تردد ٥٠ ذبذبة فى الثانية : وهذه الحالة أبسط بكثير من الحالة الأخرى، فبمراجعة معادلة القوة الدافعة الكهربية المرحلية E_1 التى تتولد فى ملفات المنتج، نجد أنها تتوقف على كل من التردد f_1 والفيض المغناطيسي المتبادل ϕ_m على النحو التالى :

$$E_1 = 4.44 \ f_1 \ \phi_m \quad N_1 \ k_{\omega 1} \times 10^{-8} \ \text{volts}$$

فاذا اعتبرنا أن ضغط الينبوع V_1 يساوى بالتقريب E_1 ، وهو ثابت القيمة ، فان استخدام التردد ٥٠ ذبذبة في الثانية بدلا من ٦٠ ذبذبـة فى الثانية يستلزم خفض ضغط الينبوع بنسبة ٥٠ إلي ٦٠ حتى لاترتفع قيمة ϕ_m بمـا يعوض مقدار النقص الناشيء فى التردد إذا ظلت قيمة V_1 بدون تغيير . لذلك نجـد أن المحركات المصنوعة فى أمريكا على أساس تردد ٦٠ ذبذبة فى الثانية وضغط ١١٥ فولت ينصح صانعها بخفض الضغط إلى ١٠٠ فولت عند استخدامها على تردد ٥٠ ذبذبة مع الاطمئنان إلي سلامة تشغيلها على هـــذا النحو . ويحتاج الأمر فى هـذه الحالة إلى استخدام محول ذاتى (auto - transfomrer) معد خصيصا لهذا الغرض . وقد تصبح المشكلة محلولة تلقائيا

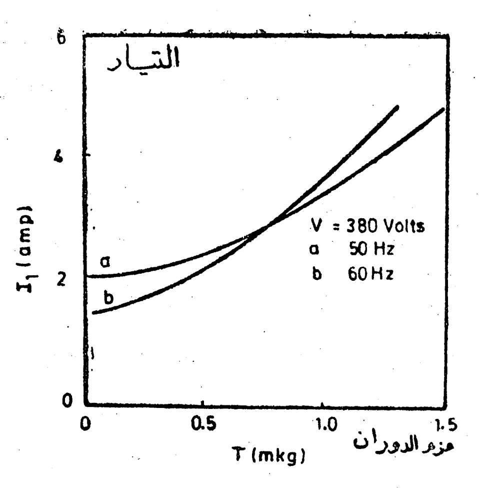
فى الأماكن النائية ، عندما يكون هناك هبوط كبير لامفر منه فى ضغط الينبوع نتيجة لبعد المحرك عن مركز التوزيع .

(ثانيا) بالنسبة للمحركات التى تصمم على أساس ٥٠ ذبذبة في الثانية وتستخدم على تردد ٦٠ ذبذبة فى الثانية : هذه هى الحالة الأصعب التى يحتاج علاجها إلى مجهود ملحوظ . وقد قام المؤلف بالاشتراك مع آخرين * باجراء بعض التجارب العملية واستخلاص بعض الحقائق المفيدة بالنسبة لهذه الحالة .

والمحرك الذى أجريت عليه التجارب يمتلك المواصفات الآتية : ذو قفص سنجابى ، ثلاثى المراحل ، ٥٠ ذبذبة فى الثانية ، ١ر٥ كيلو وات ، ٣٨٠/٢٢٠ فولت ، دلتا / نجمة ١ر٦/٥ر٣ أمبير ، ١٣٨٠ لفة فى الدقيقة ، معامل القدرة ٧٩ر٠ ، عزم دوران الحمل الكامل ١ر٠٥٦ كيلو جرام متر ، مقاومة ملفات العضو الثابت المرحلية ٠ر٣ أوم ، مقاومة ملفات العضو الدائر المرحلية منسوبة إلى العضو الثابت ٥ر٢ أوم . وقد تمت تغذية المحرك على الترددين ٥٠ ، ٦٠ ذبذبة فى الثانيه من مولد متزامن بالضغط المناسب فى كل حالة . هذا وقد أمكن تحميل المحرك على حسب الطلب ، باحدى وسيلتين : مولد تيار مستمر يعطى قدرة المخرج لمقاومة متغيرة ، أو فرملة تيارات اعصارية ، وفى كلتا الحالتين أمكن ضبط قيم مختلفة لعزم دوران الحمل على المحرك وقياس تيارات الينبوع المناظرة ، ثم حساب قدرة المدخل ومعامل القدرة ومعامل الجودة مع كل من الترددين ٥٠ ، ٦٠ ذبذبة فى الثانية ، وعند الضغط المقنن ٣٨٠ فولت . وتبين الأشكال من (٧ — ٣) إلى (١١ — ٣) المنحنيات المرسومة بالنتائج التى تم الحصول عليها . وبمراجعة هذه المنحنيات تتضح الحقائق الآتية :

---

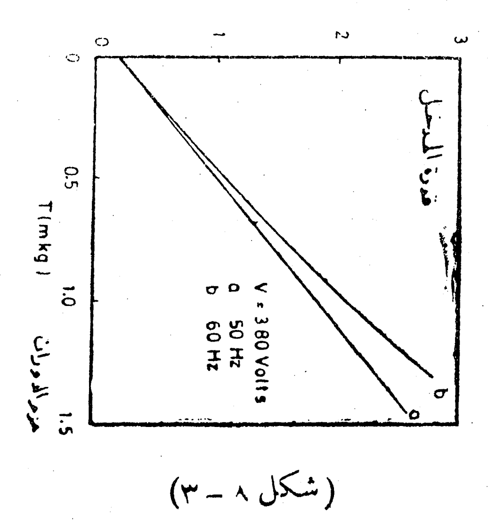
* قائمة المراجع رقم (٥).



(شكل ٧ - ٣)

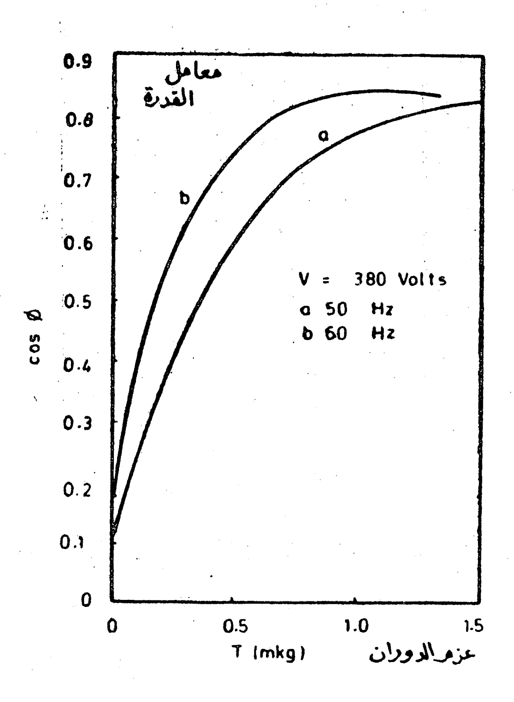
١ - يبين شكل (٧ - ٣) أن زيادة تردد التشغيل للمحرك إلى ٦٠ ذبذبة فى الثانية يؤدى إلى انخفاض ملحوظ فى قيمة تيار المدخل للمحرك عند الاحمال الصغيرة، بحيث ترتفع قيمة التيار بعد ذلك حتى تصبح مساوية لقيمة التيار المأخوذ مع التردد ٥٠ ذبذبة، ثم تزيد عنها بعد أن يتعدى الحمل على المحرك ٦٥٪ من قيمة الحمل الكامل .

٢) يبين شكل (٨ - ٣) أن زيادة التردد إلى ٦٠ ذبذبة فى الثانية تؤدى



(شكل ٨ - ٣)

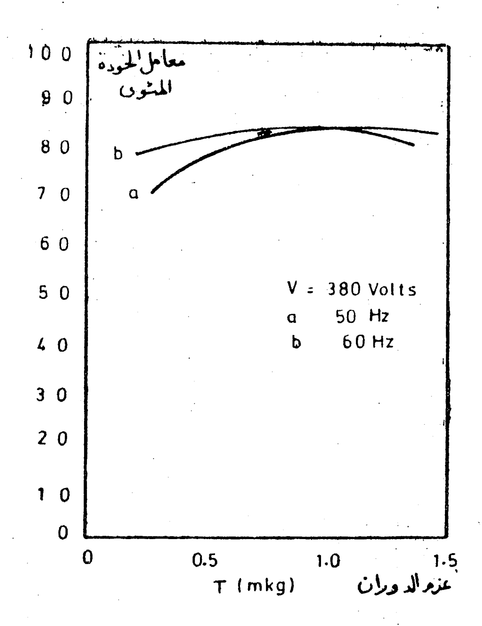
إلى زيادة فى قدرة المدخل للمحرك ، ويرتفع مقدار الزيادة كلما ازداد عزم دوران الحمل على المحرك ، كما يبين شكل (٩ ـ ٣) كيف يزداد معامل القدرة أيضا فى هذه الحالة .



(شكل ٩ ـ ٣)

٣) يزداد معامل الجودة عند الاحمال الصغيرة ، ويقل عند الاحمال التى تقرب من الحمل الكامل ، وذلك عند زيادة التردد إلى ٦٠ ذبذبة فى الثانية ، كما يتضح من شكل (١٠ ـ ٣) .

ويمكن تفسير هذه الظواهر على هدى علاقتين أساسيتين خاصتين بنظرية تشغيل المحرك ، وهما ا) أن الضغط المرخلى V الذى يعمل عليه المحرك يتناسب تقريبا مع حاصل الضرب $f \times B$ أى التردد فى كثافة الخطوط المغناطيسية فى الثغرة الهوائية B ، وهو ماسبق ذكره والاستناد إليه عند



(شكل ١٠ – ٣)

شرح علاج الحالة الأولى ، و ب) أن عزم الدوران T الذى يعطيه المحرك يتناسب مع حاصل ضرب المركبة الفعالة لتيار المحرك I_a وكثافة الخطوط المغناطيسية B ، وذلك مع اعتبار أن جميع المؤثرات الأخرى ثابتة القيمة. ونظرا لأن حاصل الضرب $B \times f$ يساوى مقدارا ثابتا (يتناسب مع قيمة الضغط الثابت V) فان T تتناسب مع $\frac{I_a}{f}$. وهذا يعنى أنه عندما تنخفض قيمة B ، نتيجة لإزدياد التردد ، مع ثبوت قيمة عزم الدوران ، فان قيمة I_a سوف تزداد تبعا لذلك . وفيما يلى بعض التحليلات الخاصة بالتأثيرات المختلفة لتغيير التردد على خواص المحرك .

تأثير تغيير التردد على تيار المحرك : يتكون تيار اللاحمل I_0 فى المحرك من تيار المغطسة I_u ، الذى تتوقف قيمته على قيمة B ، وتيار المفقودات I_1 ، الذى تتوقف قيمته على المفقودات الميكانيكية ومفقودات الحديد . وتزداد قيمة المفقودات الميكانيكية بعض الشىء نتيجة

لازدياد السرعـة . أما مفقودات الحديد فانها تتكون من مفقودات التيارات الاعصارية التى تتوقف على B^2f^2 ، والتى تظل ثابتة القيمة مادام الضغط V لم يتغير ، وكذلك من مفقودات التخلف المغناطيسي W_h التى تتناسب مع $f\,B^{1.6}$ على حسب علاقة شتينمتز (كتاب هندسة الآلات الكهربية صفحة ٩٢) أى أن .

$$W_H \propto f\,B^{1.6} \propto \frac{f^{1.6}\;B^{1.6}}{f^{0.6}} \propto \frac{V^{1.6}}{f^{0.6}}$$

وهذا يعنى أن مفقودات التخلف المغناطيسى (hysteresis losses) تقل بازدياد التردد مادامت قيمة الضغط V تظل ثابتـة . ونظراً لأن المفقودات الميكانيكية تزداد بازدياد التردد ، فلا يمكننا أن نتنبأ بما يحدث للمركبة I_1 بالضبط نتيجة لإزدياد التردد ، ولكن نظراً لأن قيمة I_1 تكون صغيرة بالنسبة لقيمة I_u ، التى تقـــل بازدياد التردد عندما تقل قيمة B ، فانه يمكن إجمال القول بأن تيار الحمل I_o يقل نتيجة لإزدياد قيمة التردد (مع ثبوت قيمة الضغط V) ، وهذا ما تحقق عمليا معـــاً ، وسبقت ملاحظته فى شكل (٧—٣) .

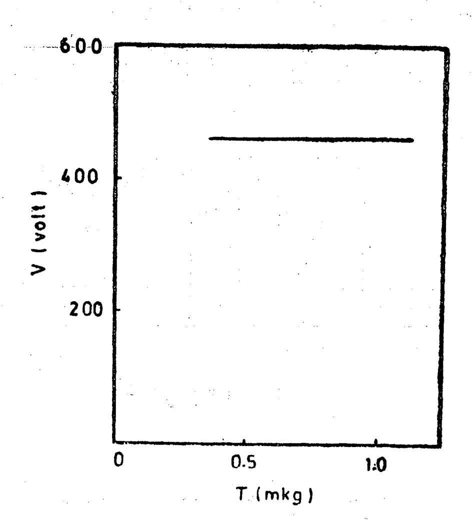
عند تحميل المحرك فانه يسحب من الينبوع التيار الفعال I_a ، إلى جانب تيار اللاحمل I_o ، الذى نعتبر أنه يظل ثابتاً تقريباً لإنشاء المجال المغناطيسي، وتعويض المفقودات الميكانيكية ومفقودات الحديد . ونظراً لأن قيمة عزم دوران الحمل T تتناسب مع $\frac{I_a}{f}$ ، كما سبق ذكره ، فان تشغيل المحرك على نفس الضغط وعند نفس عزم دوران الحمل يؤدى إلى زيادة قيمة I_a بازدياد قيمة التردد. وعند تشغيل المحرك على ٥٠ ذبذبة بدلا ٦٠ مع نفس ضغط الينبوع يتم التوازن بين مقدار النقص الناشىء فى تيـار المحرك نتيجة لإنخفاض قيمـة المركبة I_o ومقدار الزيادة الناشئـــة نتيجة لارتفـاع قيمـة المركبـة I_a عند حمل جزئى معين ، بحيث يسحب المحرك عند هذا الحمل نفس قيمة التيار مع كل من الترددين ٥ ، ٦٠ ذبذبه فى الثانيه (حوالى ٦٥ ٪ من الحمل الكلي

بالنسبه للمحرك المختبر) . وعندما يزداد الحمل على المحرك بعد ذلك، فان تأثير إرتفاع قيمه المركبه I_a يكون متغلبا ، مما يؤدى إلى زيادة فى قيمه تيار المحرك نتيجه لزيادة التردد، كما هو واضح فى شكل (٧ ـ ٣) . هذا ويمكننا أن نخرج من هذه التحليلات بنتيجه هامه ، وهو أنه يمكن تشغيل المحرك على نفس الضغط V مع ، زيادة قيمة التردد من ٥٠ إلى ٦٠ ذبذبه فى الثانية، حتى حوالى ٦٦ ٪ من الحمل الكلى بدون إتخاذ أيه إجراءات إضافيه ، كما أننا نحصل فى الغالب على خواص أفضل فى هذه الحالة .

تأثير تغيير التردد على معامل القـدرة وقدرة المدخل : يؤدى إنخفاض قيمة مركبة اللاحمل I_o فى تيار المحرك، وإرتفاع قيمة المركبة الفعالة I_a فيه، إلى زيادة فى قيمة معامل القدرة بالضرورة . ويختلف مقدار التحسن فى معامل القدرة عند الاحمال المختلفة بطبيعة الحال . هذا ومن الواضح أن زيادة السرعة نتيجة لزيادة التردد تستلزم زيادة قدرة المدخل للمحرك عند عزم دوران الحمل T $\left(T = \frac{P}{\omega} \right)$.

تأثير ضغط الينبوع على خواص المحرك ذى تردد ٥٠ ذبذبة فى الثانية :

يتبين لنا من المناقشات السابقـة أن تشغيل المحرك على تردد ٦٠ ذبذبة فى الثانية بدلا من ٥٠ يؤدى عموماً إلى نقص فى قيمة كثافة الخطوط المغناطيسية فى الثغرة الهوائية B . وينشأ عن ذلك أن يسحب المحرك تياراً من الينبوع يختلف عن التيار الذى يسحبه عند ٥٠ ذبذبة فى الثانية ، إذا استخـدم نفس الضغط المقنن V فى الحالتين . ولاشك أن رفع قيمة الضغط V عند استخدام تردد ٦٠ ذبذبة سوف يعمل على رفع قيمة B وبالتالى إستعادة قيم التيار التى يسحبها المحرك عند إستخدام التردد الأصلى ٥٠ ذبذبة فى الثانية . ولاشك أن مدى الإقتراب من منحنيـات خواص المحرك الأصلية ، مع إستخدام التردد المختلف ، يتوقف على مقدار الزيادة فى الضغط المستعمل عن الضغط المقنن ،



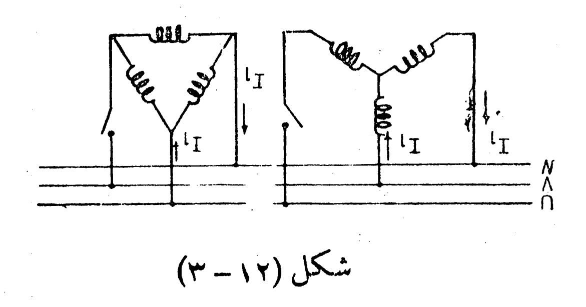
شكل (١١—٣)

ولكننا لانستطيع عموما أن نزيد الضغط عن ٢٠٪ من مقننه دون أن يتعرض المحرك لبعض المخاطر الخاصة بالعزل . هذا ويمكن الإستعاضة عن الزدياة في ضغط الينبوع بحقن المحرك في الملفات الثانوية بالضغط المناسب ، من ناحية القيمة والإتفاق المرحلي مع ضغط الينبوع ، وينصب ذلك بطبيعة الحال على المحركات ذات الحلقات الإنزلاقية فقط

تشغيل المحـرك التأثيرى ثلاثى المراحل على خطين عنـد إنفصال الخط الثالث لسبب طارىء :

عندما يحدث عطل طارىء فى أحد الخطوط الثلاثة المغذية لمحرك تأثيرى ثلاثى المراحل ، ويتم فصل هذا الخط باى شكل من الأشكال ، يصبح المحرك عاملا على خطين فقط ، يقومان بتغذية مرحلتين من ملفات المحرك موصلتين على التوالى ، إذا كان المحرك موصلا نجمـــــة ، أو تغذية مرحلتين متواليتين

موصلتين على التوازى مع المرحلة الثالثة ، إذا كان المحرك موصلا دلتا ، كما في شكل (١٢ – ٣) . وفى كلتا الحالتين يصبح المحرك مكافئا لمحرك



شكل (١٢ – ٣)

تأثيرى احادى المرحلة يتغذى بالضغط الخطى للينبوع . وإن أهم مايعنينافى هذه الحالة أمرين :

(أولا) هل المحرك فى الصورة الجديدة فى حالة اتزان ، بحيث يمكن أن يتابع أداء الحمل على أى وجه من الوجوه و (ثانيا) ما هى الاحتياطات اللازم اتخاذها لكى لايضار المحرك من متابعة اداء الحمل على نحو معين .

إن مناقشة الموضوع علي هـذا النحو يستبعد فصل المحرك عن الينبوع تماما ، وهو الإجراء الذى قد يتبادر إلي الذهن اتخاذه تلقائيا لاول وهـلة ولكننـا قد نلجأ إليه مع ذلك أحيانا ، إذا فشلنا فى اتخاذ ما سوف يتم شرحه من اجراءات فيما بعد .

عندما يكون المحرك دائرا بالحمل في حالة طبيعة فان هــذا يعنى وجود اتزان ديناميكى (dynamic equilibrium) بين عزم الدوران الكهربائى T_e الذى يبذله المحرك ، وعزم الدوران الميكانيكى المضاد T_m الذى يسببه وجود الحمل . وفي هذه الحالة تكون سرعة دوران المحرك n محددة لمعامل الانزلاق S ، الذى يتعين على أساسه عزم الدوران الكهربائى للمحرك T_e على منحنى عزم الدوران في منطقة الاتزان ، كما سبق شرحه من قبل .

إذا فرضنا أن الضغط الخطي للينبوع (line voltage) هو V ، وأن التيار الخطى هو I_3 ، ومعامل القدرة $\cos \phi_3$ ، ومعامل جودة المحرك η_3 ، وهو دائر بالحمل الكامل فى حالة طبيعية والخطوط الثلاثة متصلة، نجد أن قدرة المخرج P_3 عبارة عن :

$$P_3 = \sqrt{3}\ V\ I_3\ \cos \phi_3 \times \eta_3$$

وإذا فرضنا أن التيار الذى يأخذه المحرك بين خطين عند فصل الخط الثالث هو I_1 ومعامل القدرة $\cos \phi_1$ ، ومعامل جودة المحرك η_1 فى هذه الحالة ، فان قدرة المخرج للحمل P_1 تكون :

$$P_1 = V\ I_1\ \cos \phi_1 \times \eta_1$$

وحيث أنه لم يتغير أى شىء بالنسبة للحمل ، وهو يأخذ القدرة التى يحتاج إليها من المحرك فى أى شكل من الاشكال، فان $P_3 = P_1$ ، وحينئذ نجد أن :

$$\sqrt{3}\ V\ I_3\ \cos \phi_3 \times \eta_3 = V\ I_1\ \cos \phi_1 \times \eta_1$$

$$\therefore\ I_1 = I_3\ \frac{\cos \phi_3\ \eta_3}{\cos \phi_1\ \eta_1} \times \sqrt{3}$$

وهذه هى قيمة التيار الذى يسحبه المحرك بين خطين، بالنسبة للتيار الخطى والخطوط الثلاثة متصلة . ومن الواضح أن المحرك سوف يأخذ تيارا I_1 فى الحالة الجديدة اكبر من I_3 الأصلى لكى يستطيع مواجهة الحمل . وهذا يعنى أنه فى حالة انفصال أحد الخطوط سوف يكون عزم الدوران الميكانيكى المضاد T_m أكبر من عزم دوران المحرك T_e ، مما يؤدى إلى وجود عزم دوران تقصيرى (retarding torque) يعمل على تقليل سرعة المحرك n ، وبالتالى زيادة معامل الإنزلاق S . ونظرا لأن زيادة معامل الإنزلاق فى منطقة الاتزان يؤدى إلى زيادة عزم الدوران الذى يبذله المحرك ، فاننا نتوقع بقاء المحرك فى حالة الاتزان

عندما ينفصل أحدالخطوط، مع زيادة التيار الذى يسحبه بين الخطين الباقيين، على النحو المبين سابقا، لمواجهة الحمل .

فاذا اعتبرنا أن قيمة $\frac{\cos \phi_3 \ \eta_3}{\cos \phi_1 \ \eta_1}$ قريبة من الواحد الصحيح ، فان هذا يعنى أن تيار المحرك سوف يزداد إلى ١ر٧ مرة تقريبا ، وهو ما يعتبر حملا زائدا على المحرك لايمكن تركه أكثر من بضع دقائق دون فصله ، هذا إذا لم يقم متمم فوق الحمل باداء هذه المهمة تلقائيا بعد وقت محدد . والحل الظاهر فى هذه الحالة هو تقليل الحمل على المحرك بنسبة $\frac{1}{\sqrt{3}}$ تقريبا ، أى إلى حوالى ٥٧٪ من الحمل الأصلى ، حتى يمكن للمحرك أدائه دون أن يلحق به الضرر .

هذا وبتطبيق نظرية المركبات المتماثلة على تيارات المحرك مع اعتبار أن الخط المفصول هو الخط رقم ١ نحصل على الآتى :

$$I_1 = O \quad , \quad I_2 = I \quad , \quad I_3 = - I$$

وتكون المركبات المتماثلة للتيار عبارة عن :

$$I_0 = \tfrac{1}{3} (I_1 + I_2 + I_3) = \tfrac{1}{3} (O + I - I) = O$$

$$Ip = \tfrac{1}{3} (I_1 + a I_2 + a^2 I_3) = \tfrac{1}{3} (o + a I - a^2 I)$$

$$= \tfrac{1}{3} (a - a^2) I = \frac{j}{\sqrt{3}} I \quad , \ (a - a^2) = j \sqrt{3}$$

$$I_n = \tfrac{1}{3} (I_1 + a^2 I_2 + a I_3) = \tfrac{1}{3} (o + a^2 I - a I)$$

$$= \tfrac{1}{3} (a^2 - a) I = - \frac{j}{\sqrt{3}} I \ ,$$

$$(a^2 - a) = j \sqrt{3}$$

وهـــذا يعنى وجود مجالين مغناطيسيين دائريين متساويين يدوران فى

اتجاهين متضادين بنفس سرعة التزامن ، على نفس النمط الذى سوف يتم بيانه عند شرح المحرك التأثيرى أحادى المرحلة فى باب قادم . ويؤدى ذلك إلى وجود تيارين تأثيريين فى ملفات العضو الدائر ، مما يعمل على زيادة مفقودات النحاس في هذه الملفات وانخفاض قيمة معامل الجودة للمحرك . وينتج عن وجود المجـال المغناطيسى الجديد ، بعد انفصال أحد الخطوط ، وهو الذى يدور فى عكس اتجاه دوران المحرك ، ظهور طنين أو أزيز ناشىء عن اهتزازات مغناطيسية فى رقائق حديد العضو الدائر (magnetic vibrations) . ويكون هذا الطنين أو الأزيز عادة هو العامل الأساسى الذى يمكن أن ينبه القائم على تشغيل المحرك إلى حدوث الانفصال فى أحد الخطوط . كذلك يؤدى وجود المجالين المغناطيسيين إلى انخفاض قيمة معامل القدرة $\cos \phi_1$ الجديد عن قيمة معامل القدرة الأصلى $\cos \phi_3$.

وهـــذا كلـه يعنى أن قيمة الكسر $\frac{\cos \phi_3 \; \eta_3}{\cos \phi_1 \; \eta_1}$ سوف تكون اكبر قليلا من الواحد الصحيح ، ممـا يجعلنا نفضل خفض الحمـل على المحـرك إلى ٥٠ ٪ فقط من الحمل الإصلى ، بدلا من ٥٧ ٪ التى أشرنا إليها من قبل .

مثال محلول :

A 3 phase induction motor is running on a constant load , when one of the Supply lines to it becomes disconnected . The overload circuit breakers will operate at 1.4 times full load Current , and the motor is running at 0.75 of full load.

Calculate approximately the current in each phase in terms of the full load Current , both for a star Connected and for a delta connected stator .

يبين شكل (١٢ ــ ٣) توصيل المحرك في حالتى الدلتا والنجمة بعد فتح

أحد الخطوط ، حيث يأخـــذ المحرك التيار I_1 بين الخطين المتصلين . ومن التحليل السابق ، مع اعتبـــار $\frac{\cos\ \phi_3\ \eta_3}{\cos\ \phi_1\ \eta_1}$ يساوى الواحد الصحيح ، نجد بالنسبة لحالة النجمة أن تيار الخط هو التيار المرحلى وهو :

$$I_1 = \sqrt{3}\ I_3 = \sqrt{3} \times 0.75\ I_{f.1} = 1.299\ I_{f.1}$$

حيث $I_{f.1}$ هو تيار الحمل الكامل عندما تكون الخطوط الثلاثة متصلة . ونظرا لأن قاطع الدائرة مضبوط على أساس فتح الخطوط عند $1.4\ I_{f.1}$ فمن المرجح أنه سوف يظل مقفلا .

أما بالنسبة لحالة الدلتا فان التيار المسحوب بين خطين I_1 بعد فصل الخط الثالث سوف تكون له نفس القيمة السابقة وهى $1.299\ I_{f.1}$ ، حيث لم يتغير أى شيء بالنسبة للخطوط . ولكننا نجـــد أن توصيل المراحل بعد الفصل يختلف الآن عن الحالة السابقة ، حيث تصبح المرحلتان الخارج من بينهما الخط المفصول موصلتين معا على التوالى ، ومتصل معهما على التوازى المرحلة الثالثة الواصلة على الخطين الباقيين . ونظرا لأن المراحل الثلاث متماثلة من ناحية معاوقة التيار ، فمن الواضح أن التيار الخطى I_1 سوف ينقسم بنسبة ١ : ٢ فى الممرين المتصلين على التوازى ، بحيث يمر $\frac{1}{3}\ I_1$ فى المرحلتين المتصلتين على التوالى معا ، ويمر $\frac{2}{3}\ I_1$ فى المرحلة الثالثة .

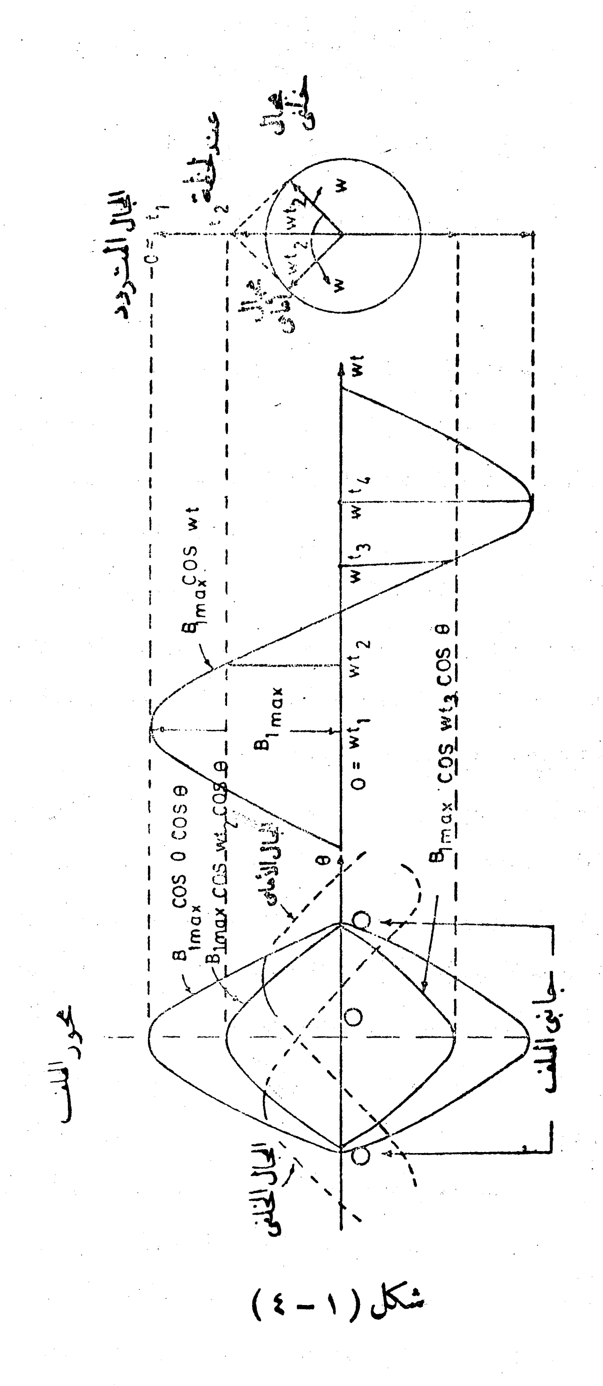
الباب الرابع

المحركات التأثيرية أحادية المرحلة

Single - Phases Induction Motors

نبذة عامة :

يشبه المحرك التأثيرى أحادى المرحلة الشائع الاستعمال المحرك التأثيرى ثلاثى المراحل ذا القفص السنجابى عموما فى تكوينه ، فيما عدا ترتيب الملفات فى العضو الثابت ، حيث تكون الملفات احادية المرحلة فى هذه الحالة . وعند مرور تيار متردد فى هذه الملفات ، من ينبوع احادى المرحلة ، نحصل على موجة للقوة الدافعة المغناطيسية يكون توزيعها ثابت الشكل بالنسبة الفراغ ولكنها تتغير فى القيمة مع الزمن على حسب تغير تيار الينبوع المتردد . يتم توزيع الملفات فى مجارى العضو الثابت بحيث نحصل على قوة دافعة مغناطيسية يكون توزيعها الفراغى على شكل منحنى جيبى ،ومن ثم نحصل على منحنى جيبى لكثافة الخطوط المغناطيسية فى الثغرة الهوائية B ، كما هو موضح فى شكل (١ ـ ٤) ، الذى يفترض فيه أن ملفات العضو الثابت مركزة فى ملف واحد ذى جانبين فقط ، وأن النهاية العظمى لكثافة الخطوط المغناطيسية تقع على محور هذا الملف . يظل منحنى كثافة الخطوط المغناطيسية محتفظا بشكله الجيبى هذا ، ولكن احداثياته تتغير من لحظة إلى أخرى بتغير قيمة التيار المتردد اللحظية الذى يصنعه ، فنحصل على المنحنيات الجيبية المبينة فى الشكل عند اللحظات المختارة t_4 , t_3 , t_2 , t_1 . شكل (١ ـــ ٤) يبين كيف تتغير قيمة النهاية العظمى لكثافة الخطوط المغناطيسية عند محور الملف مع تغير التيار المتردد ذى الشكل الجيبى أيضا ،على أساس أن B_{1max} هى النهاية العظمى لكثافة الخطوط المغناطيسية على محور الملف ، عندما تكون قيمة التيار المتردد المارفيه فى نهايتها العظمى أيضا . وهذا يعنى أنه عند اللحظة t_2 تصبح قيمة



محور الملف
المجال المتردد
O = t1
عند لحظة t2
مجال خلفي
مجال أمامي
w
wt2
$B_{1max} COS\ wt$
B_{1max}
O = wt1
wt2
wt3
wt4
wt
θ
$B_{1max} COS\ 0\ COS\ θ$
$B_{1max} COS\ wt_2\ COS\ θ$
$B_{1max}\ COS\ wt_3\ COS\ θ$
المجال الأمامي
المجال الخلفي
جانبي الملف

شكل (١ – ٤)

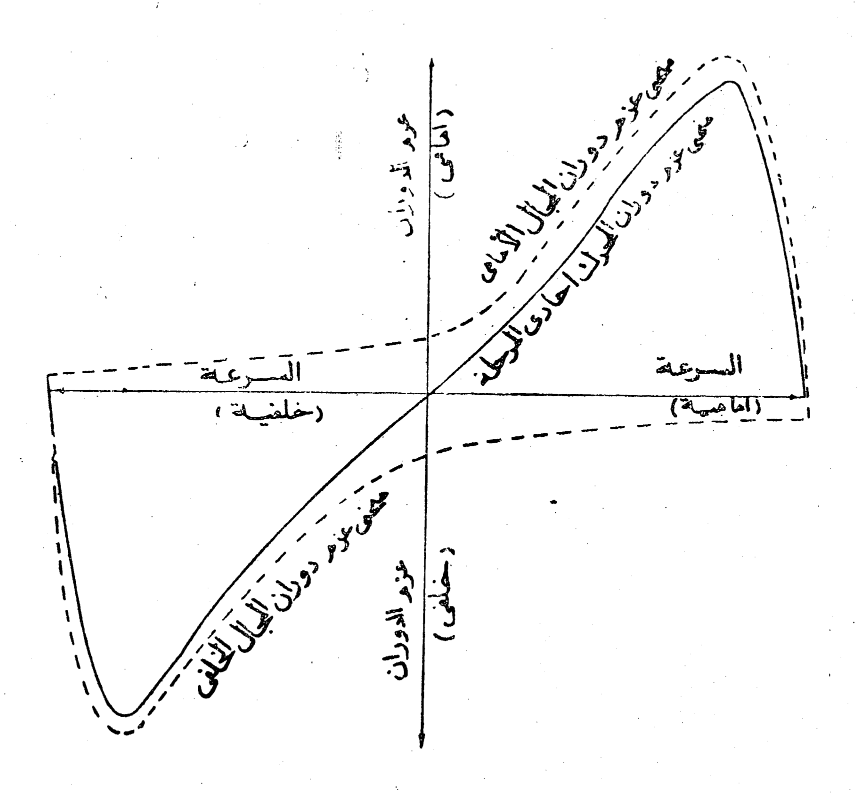
النهاية العظمى لكثافة الخطوط المغناطيسيةعند محور الملف هى $B_{1max} \cos\omega t_2$ على أساس تغير قيمة التيار المـــار من I_{1max} فى الحـــالة الأولى إلى $I_{1max} \cos \omega t_2$ فى الحـــالة الثانية . فاذا اعتبرنا أية نقطة على محيط العضو الثابت تبعد عن محور الملف بزاوية مقدارها θ ، فان قيمة كثافـة الخطوط المغناطيسية B بدلالة قيمة النهاية العظمى اللحظية عند اللحظة t هى عند محور الملف $B_{1max} \cos \omega t$ ، وعند النقطة المحددة بالزاوية θ هى :

$$B = B_{1max} \cos \omega t \cos \theta \qquad (٤-١)$$

$$= \frac{1}{2} B_{1max} \cos (\theta - \omega t) + \frac{1}{2} (B_{1max} \cos (\theta + \omega t) \qquad (٤-٢)$$

يمثل كل حد من الحدين في المعادلة (٢ - ٤) موجة سائرة (travelling wave) ذات اتساع(amplitude) $\frac{1}{2} B_{1max}$ ، بحيث تدور الموجتان فى اتجاهين متضادين بنفس السرعة الزاوية ω حول محيط المنتج، كما سبق شرحه بالتفصيل فى بند التوافقيات الفراغية وعلاقتها بتوافقيات منحنى التيار صفحة ١٠٨ من كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية . ويمكن اعتبار كل من هاتين الموجتين مجالا مغناطيسيا دائرا يقوم بنفس عمـــل المجال المغناطيسي الدائر فى حالة المحرك التأثيرى ثلاثى المراحل . وهـــذا يعنى اننا نستطيع الحصول عـــلى نظرية المحرك التأثيرى احادى المرحلة، بتطبيق قاعـــدة التجميع على خواص محركين متشابهين، كل منهما ثلاثى المراحل ، ويدور أحدهما في عكس اتجاه الآخر . فإذا أطلقنا على المجال الذى يدور فى الاتجاه الموجب (وليكن عكس اتجـــاه عقربى الساعة)، كما نفعل عادة، اسم المجال الأمامى (forward field) ، وعلى المجال الآخر اسم المجال الخلفى (backward field) ، ورسمنا منحنى عزم الدوران لكل منهما باعتبار أنه عزم دوران المحرك الثلاثى، الذى سبقت

دراسته بالتفصيل فى الباب الأول ، نستطيع كما هو مبين فى شكل (٢ ـ ٤) الحصول على منحنى عزم الدوران للمحرك التأثيرى احادى المرحلة . ويكون عزم الدوران الذى يتولد بتأثير المجال المغناطيسي الأمامي على القفص السنجابى فى العضو الدائر مضادا لعزم الدوران الذى ينشأ بفعل المجال المغناطيسى الخلفى فى نفس القفص السنجابى على العضو الدائر . فى حالة السكون تكون قيمة عزم الدوران الناشئة عن كل من المجالين واحدة مما يجعل محصلة عزم الدوران المؤثر على العضو الدائر فى هذه الحالة تساوى صفرا ، فلا يوجد عزم دوران بدء للمحرك احادى المرحلة ، وهي احدى الخصائص المميزة لهذا المحرك .



(شكل ٢ ـ ٤)

عندما يدور المحرك في الاتجاه الموجب ، أي في نفس اتجاه دوران المجال الأمامي ، ويكون معامل الانزلاق $S = \frac{n_s - n}{n_s}$ ، يكون المجال الخلفي دائرا في عكس الاتجاه بالسرعة n_s ، مما يعني أنه يدور بالسرعة $(n_s + n)$ بالنسبة للعضو الدائر . وباعتبار التعريف الأساسي لمعامل الانزلاق ، وهو خارج قسم سرعة دوران المجال المغناطيسي الخلفي ،بالنسبة للعضو الدائر ، على سرعة التزامن ، يكون معامل الانزلاق الخاص بهذا المجال هو

$$\frac{n_s + n}{n_s} = \frac{2 n_s + n - n}{n_s} = \frac{2 n_s - (n_s - n)}{n_s}$$

$$= (2 - s) \qquad (٤-٣)$$

أي أن قيمة معامل الإنزلاق الخاص بالمجال الخلفي تكون كبيرة جدا بالنسبة لقيمة معامل الإنزلاق الخاص بالمجال الأمامي، وهذا يعني أن القوة الدافعة الكهربية المتولدة في ملفات العضو الدائر E_{20} (s — 2) بفعل المجال الخلفي تكون كبيرة بالنسبة للقوة الدافعة الكهربية المتولدة بفعل المجال الأمامي $S E_{20}$. ولكن في نفس الوقت تكون ممانعة التسرب في العضو الدائر في حالة المجال الخلفي $\times_{20}$ (s — 2) كبيرة بالنسبة لممانعة التسرب في حالة المجال الأمامي $S \times_{20}$. والنتيجة الاجمالية في هذه الحالة أن المجال الخلفي ينشيء تيارا في ملفات العضو الدائر يكون أكبر قيمة من التيار الذي ينشئه المجال الأمامي ، كما أن تردده f_1 (s — 2) يكون ضعف تردد الينبوع تقريبا ، ولكن معامل قدرته يكون منخفضا جدا بسبب انخفاض النسبة $\frac{R_2}{(2 - s) \times_{20}}$ انخفاضا كبيرا بالنسبة لهذا المجال . وعلى هذا الاساس يمكن تلخيص تأثير المجال المغناطيسي الخلفي بالنسبة لتشغيل المحرك بفعل المجال المغناطيسي الأمامي فيما يلي :

١ ــ زيادة المفقودات النحاسية للعضو الدائر، بفعل التيار الناشيء عن المجال الخلفي ، وهو يزيد في قيمته وتردده على التيار الناشيء عن المجال الأمامي .

٢ ـ يكون تأثير تيار العضو الدائر الكبير، ذى معامل القدرة المنخفض، الناشىء عن المجال الخلفى، تأثيرا مغناطيسيا كبيرا مضادا لهذا المجال عندما تزداد سرعة المحرك، مما يقلل من محصلة خطوط القوى المغناطيسية الناشئة فى الثغرة الهوائية للمحرك بفعل هذا المجال، وبالتالى من تأثيره على عزم دوران المحرك. وفى الحقيقة أنه بينما تزداد محصلة خطوط القوى المغناطيسية الناشئة عن المجال الأمامى بازدياد السرعة، تقل محصلة خطوط القوى المغناطيسية الناشئة عن المجال الخلفى، بحيث يظل مجموعها ثابتا تقريبا، وهو ما يلزم لانتاج القوة الدافعة الكهربية المضادة فى ملفات العضو الثابت، التى يمكن اعتبارها ثابتة تقريبا، إذا كانت قيمة هبوط الضغط فى معاوقة التسرب للعضو الثابت صغيرة. وفى الحقيقة فان المجال المغناطيسي الأمامى يكون أكبر كثيرا من المجال المغناطيسى الخلفى، بحيث نستطيع أن نعتبر أن المجال المحصل الناشىء فى الثغرة الهوائية للمحرك، لا يختلف عن المجال المغناطيسى الدائر فى المحرك ثلاثى المراحل فى ملامح كثيرة من نواحى تأثيره.

٣ ـ ينشأ عن التشابك بين كل من المجال المغناطيسى الدائر وموجة القوة الدافعة المغناطيسية الدائرين في اتجاهين متضادين، نبضات فى عزم الدوران (torque pulsations) ذات تردد ضعف تردد الينبوع. وتكون حصيلة عزم الدوران المتوسط لهذه النبضات بالنسبة للزمن صفرا، ولكنها تؤدى إلى صدور ضجة (Noise) عن المحرك احادى المرحلة لا توجد فى المحركات ثلاثية المراحل. ولا تظهر هذه النبضات فى منحنى عزم الدوران مع السرعة للمحرك أحادى المرحلة، نظرا لأن عزم الدوران في هذه الحالة هو القيمة المتوسطة بالنسبة للزمن.

طرق البدء ومنحنيات التشغيل للمحركات التأثيرية احادية المرحلة :

(Methods of starting and performance Characteristics of single phase induction motors)

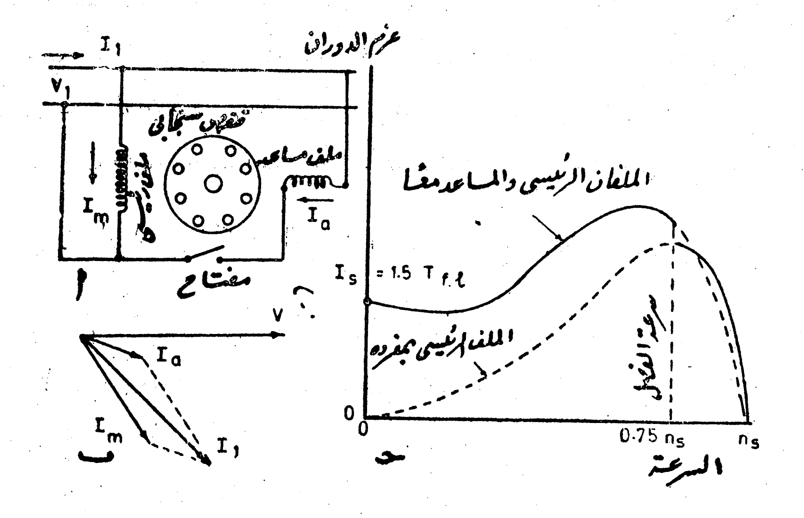
يكون تصنيف المحركات التأثيرية احادية المرحلة على حسب طرق البدء

فيها ، وتتم تسميتها عادة على هذا الأساس. وفيما يلى نتناول بالوصف والتحليل المختصر على هذا النحو للانواع شائعة الاستعمال من هذه المحركات .

١ ـ المحرك مشطور المرحلة (Split - phase Motor) .

يحتوى العضو الثابت لهـذا النوع من المحركات على نوعين من الملفات ، وهما الملفات الرئيسية س والملفات المساعدة ع ، ويكون توزيع هذه الملفات فى مجارى العضو الثابت بحيث توجد زاوية فراغية بين محوريهما مقدارها تسعون درجة كهربية ، ويبين شكل (٣ ـ ٤) ا الملفات في المحـرك موصلة على هذا الأساس .

ويراعى أن تمتلك الملفات المساعدة مقاومة كبيرة بالنسبة لممانعتها ، فتتكون لذلك من أسلاك رفيعة ، فى حين تكون نسبة المقاومة إلى الممانعة أقل من ذلك بصورة ملحوظة فى الملفات الرئيسية . ونظرا لأن كلا من نوعين الملفات موصل على ضغط واحد لنفس الينبوع ، فان الوضع المرحلى لكل من تيارى



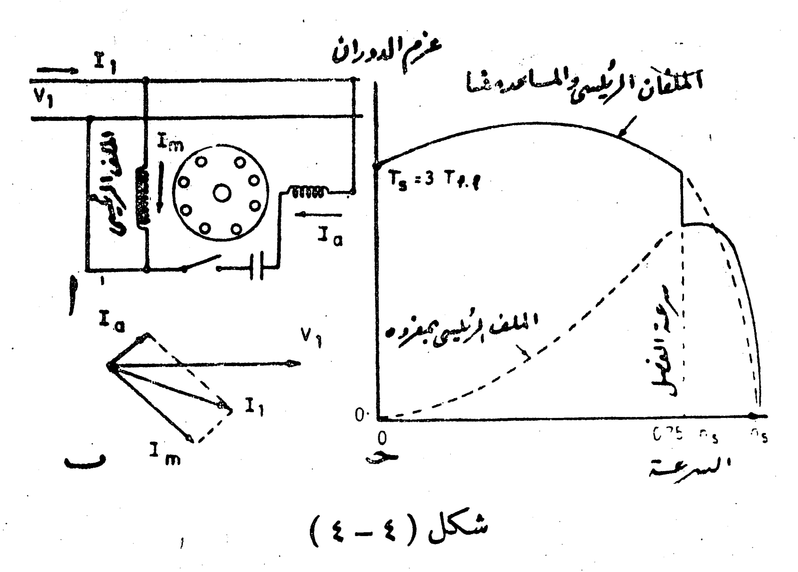
(شكل ٣ ـ ٤)

هـذه الملفات يصبح كما هو مبين فى شكل (٣ ـ ٤) ب ، حيث يكون تيار الملفات المساعدة I_a متأخرا بزاوية صغيرة على ضغط الينبوع ، بينما يكون تيار الملفات الرئيسية I_m متأخرا بزاوية اكبر من ذلك بصورة ملحوظة على نفس الضغط . ينتج عن ذلك أن يصبح المحرك مكافئا لمحـرك ذى مرحلتين، تتمثلان فى الملفات الرئيسية والملفات المساعدة ، مما يعنى وجود مجال مغناطيسى دائر فى المحرك ، وهو الذى يجعل عملية البدء ممكنة، ويؤدى إلى دوران المحرك عند وصل نوعي الملفات بالينبوع . ويتم فصل الملفات المساعدة عن الينبوع عندما يصل المحرك إلي حوالي ٧٥٪ من سرعة التزامن ، ويكون باستخدام مفتاح يعمل بالقوة الطاردة المركزية (Centrifugal switch) .

هذا ونظرا لأن الملفات المساعدة لاتعمل إلا فى خلال فترة البدء فقط ، فان صنعها من أسلاك رفيعة لكى تكون مقاومتها عالية لا يشكل خطرا عليها ، كما أنه يمكن تقليل ممانعتها بوضعها فى الأجزاء العليا من المجارى. ويبين شكل (٣ ـ ٤) جـ منحنى الخواص التقليدى لهذا المحرك فى خلال فترة البدء عندما يؤثر نوعا الملفات معا ، ثم بعد أن تصبح الملفات الرئيسية عاملة بمفردها بعد انفصال الملفات المساعدة عن الينبوع . وتبين أجزاء المنحنى المتقطع ما يمكن أن يحـــدث لو لم تكن الملفات المساعدة موجودة فى خلال فـترة البدء ، ثم لو استمرت هذه الملفات تعمل مع الملفات الرئيسية في خلال فترة التشغيل .

٢ ـ المحرك ذو مكثف البدء : (Capacitor - start Induction Motor)

يكون الحصول على عزم دوران بدء لهذا المحرك على نفس الأساس فى المحرك السابق من حيث تزويد المحرك بنوعين من الملفات ، رئيسية ومساعدة ، تجعل المحرك مكافئا لمحرك ذى مرحلتين مع تغذيته من ينبوع احادى المرحلة . ويتم تكوين زاوية فرق مرحلى زمنى (angle of time - phase difference) بين تيارى التغذية من نفس الينبوع بتوصيل مكثف على التوالى مع الملفات المساعدة ، كما هو مبين فى شكل (٤ ـ ٤) ا



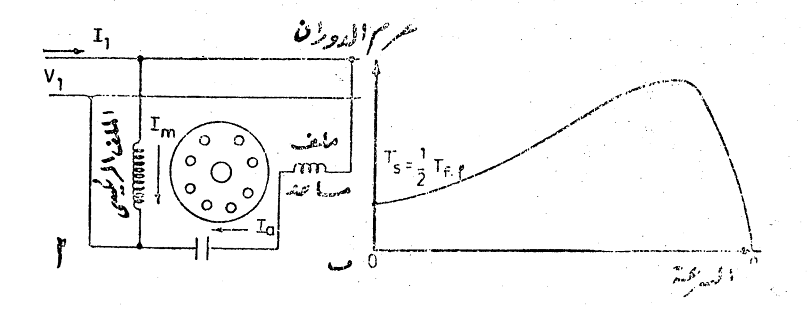
شكل (٤ ــ ٤)

ويتم فصل الملفات المساعدة فى هذه الحالة أيضا على النحو السابق بعد بدء المحرك ، مما يعنى اقتصار عمل الملفات المساعدة ومكثف البدء على فترة البدء فقط . وهــذا يساعد على تقليل تكلفة كل منها . يبين شكل (٤ ــ ٤) ب مخطط المتجهات ، كما يبين شكل (٤ ــ ٤) حـ منحنى عزم الدوران مع السرعة، على نفس النمط المبين به فى الحالة السابقة .

٣ ــ المحرك ذو المكثف الدائم (Permanent- split - capacitor motor)

يمكن أن تظل الملفات المساعدة عامـلة مع الملفات الرئيسية أثناء تشغيل المحرك، بتركها موصلة على الينبوع خلال فترة التشغيل، بعد انتهاء فترة البدء . فيتم الاستغناء عن المفتاح S المشار إليه فى الحالتين السابقتين، كما هو مبين فى شكل (٥ ــ ٤) ا ، ويصبح المحرك أكثر بساطة فى تكوينه ، حيث يصبح هذا المفتاح منشأ لبعض المتاعب الفنية أحيانا . ويكون تصميم الملفات المساعدة والمكثف على هذا الأساس عند الحمل المطلوب ، وينتفى وجود المجال الخلفى، مما يؤدى إلى تحسن في قيمة معامل الجودة فى هذه الحالة . كذلك تختفى الضجة

الصادرة عن المحرك نتيجة لاختفاء نبضات عزم الدوران ذى التردد المضاعف



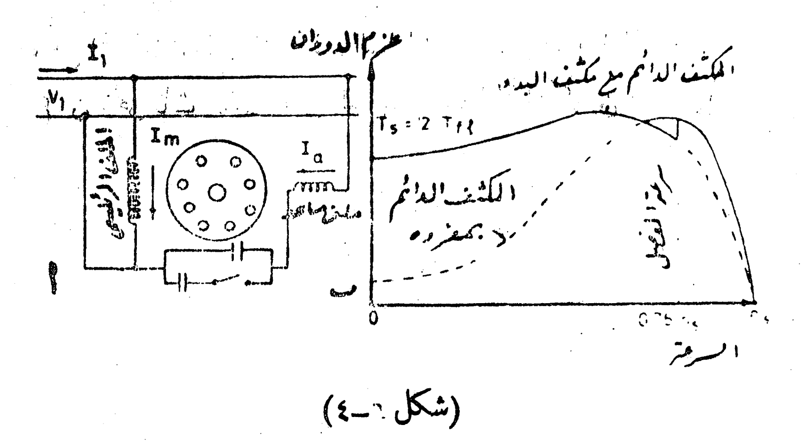
(شكل ٥ ــ ٤)

الذى سبقت الاشارة إليه . ولكن يلزم استخدام مكثف ورقى مشبع بالزيت (oil impregnated paper) ، وهو أغلى ثمنـــا من المكثفات ذات السائل الكهربى(electrolytic capacitors)، التى يمكن استخدامها مع المحرك ذى مكثف البدء . كذلك نلاحظ فى شكل (٥ ــ ٤) ب أن عـزم دوران البدء يقل عن الحالة السابقة ، حيث يتم اختيار المكثف فى هـذه الحالة على أساس المواءمة بين متطلبات فترتى البدء والتشغيل معا .

٤ ــ المحرك ذو المكثفين (Two - value -capacitor motor):

يمكن استخدام مكثفين، أحدهما خاص بفترة البدء فقط ، والآخر يتجاوز عمله فترة البدء إلى فترة التشغيل أيضا ، بحيث نستطيع المواءمة فى هذه الحالة بين الخواص المفضلة المطلوبة فى الفترتين معا .

يبين شكل (٦ ــ ٤) ا الرسم التخطيطى لمحرك من هـذا النوع يستخدم فيه مكثف صغير من النوع الورقى ، يتم توصيله مع الملفات المساعدة توصيلا دائما خلال فترة التشغيل على الينبوع ، لاعطاء افضل الخواص المطلوبة فى هذه الفترة ، كما يستخدم فيه أيضا مكثف بدء من النوع ذى السائل الكهربى،



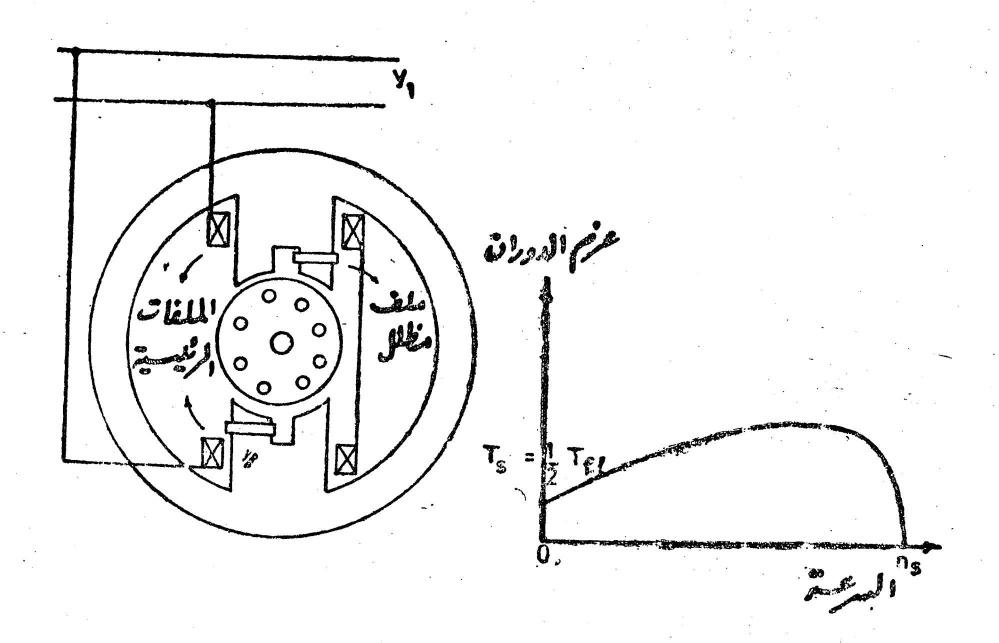
(شكل ٦ـ٤)

موصل مع المفتاح الخاص به على التوازى مع المكثف الورقى، لكى يعمل معه فى خلال فترة البدء فقط، ثم يصبح منفصلا فى خلال فترة التشغيل .

٥ ـ المحرك ذو القطب المظلل (Shaded - pole motor)

يتكون العضو الثابت فى هذا المحرك من أقطاب بارزة ، كما هو مبين فى شكل (٧ ـ ٤) ا حيث يتم تطويق جزء من كل قطب منها بلفة مقصورة من النحاس يطلق عليها اسم الملف المظلل (Shading coil) . تتولد فى هذه اللفة المقصورة تيارات تأثيرية بفعل جزء الفيض المغناطيسى للقطب المتشابك معها ، يؤدى إلى جعل محصلة هذا الجزء من الفيض المغناطيسي، الناشىء عن التيارات التأثيرية، متخلفاً زمنيا بزاوية مرحلية عن الجزء الباقى من الفيض المغناطيسى المار فى الجزء الآخر من القطب . وينشأ عن ذلك ظاهرة تكافىء ظاهرة وجود مجال مغناطيسي دائر، يتحرك من الجزء غير المظلل إلي ناحية الجزء المظلل من القطب ، مما يعنى وجود عزم دوران بدء صغير ، يعمل على بدء دوران المحرك . ويبين شكل (٧ ـ ٤) ب شكل منحني عزم الدوران مع السرعة لهذا المحرك . ويقتصر استخدام هذه الطريقة عادة على المحركات الصغيرة

جدا ، مثل تلك التى تستخدم فى المراوح الصغيرة أو تلك التى تكون وسيلة البدء فى المحركات المستخدمة فى الساعات . ويكون معامل الجودة فى هذا النوع من المحركات صغيرا ، ولكنه يتميز ببساطة التكوين ورخص الثمن .



(شكل ٧ — ٤)

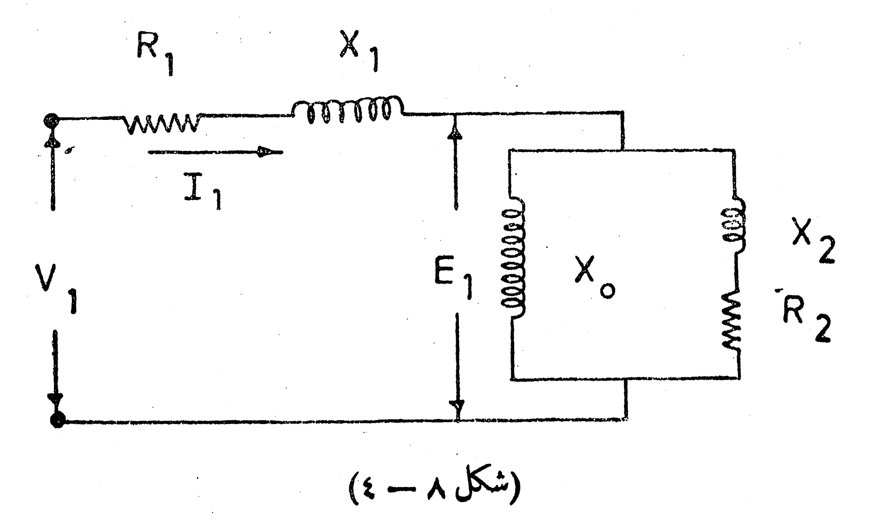
استخدام نظرية المجـــال المغناطيسي الدائر فى تحليل المحركات التأثيرية إحادية المرحلة :

Application of the revolving field theory in single-phase Induction Motors)

سبق أن بينــا أن المجال المغناطيسى المتردد، الذى ينشئه الملف الرئيسي فى المحرك التأثيرى أحادى المرحلة ، نتيجة لمرور تيار الينبوع أحادى المرحلة فيه ، يمكن تحليله إلى مجالين يدور كل منهما فى عكس اتجاه دوران الآخر ، بنفس

سرعة التزامن n_s ، ويكون اتساع موجة القوة الدافعة المغناطيسية فى كل من المجالين نصف اتساع موجة القوة الدافعة المغناطيسية للمجال المتردد . ويقوم كل من هذين المجالين بانشاء تيارات تأثيرية خاصة به فى ملفات العضو الدائر ، وتوليد عزم دوران تأثيرى على أساس نظرية المحرك التأثيرى ثلاثي المراحل كما سبق شرحها بالضبط . ويمكن علي هذا النحو عمل تحليل كمى (quantative) للمحرك التأثيرى أحادى المرحلة على نمط التحليل الذى سبق استخدامه في المحركات التأثيرية ثلاثية المراحل ، وذلك بتطبيق نظريات الأخيرة على كل من مجالى الاول.

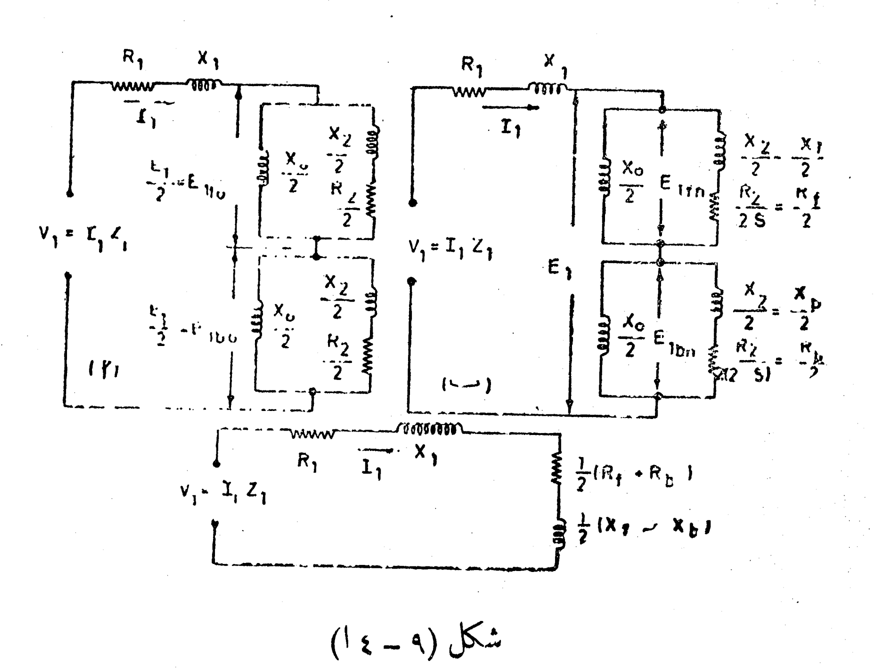
نبدأ أولا بالحالة التى يكون فيها العضو الدائر لا يزال فى حالة السكون ، عندما يوصل الملف الرئيسي فى المحرك احادى المرحلة إلى ينبوع التيار المتردد. تتكون الدائرة المكافئة للمحرك فى هذه الحالة من الملف الثانوى المقصور ذى المقاومة R_2 وممانعة التسرب X_{20} ، منسوبتان إلي الملف الابتدائى، ومن ممانعة تيار المغطسة X_0 ، ثم من مقاومة الملفات الرئيسية على العضو الثابت R_1 وممانعة التسرب لهذه الملفات X_1 . ولا تظهر R_0 فى الدائرة المكافئة لأننا نهمل مفقودات الحديد التي نأخذها فى الاعتبار بعد ذلك كجزء من المفقودات الميكانيكية . يبين شكل (٨ – ٤) هذه الدائرة المكافئة حينما يكون ضغط



(شكل ٨ — ٤)

الينبوع الموصل إلى المحرك هو V_1، والتيار الذى يسرى فى الملف الرئيسي على العضو الثابت هو I_1 ، والقوة الدافعة الكهربية (المضادة) E_1 ، المتولدة في هذا الملف بفعل محصلة المجال المغناطيسي المتردد (أو الفعـــل المشترك للمجالين الأمامى والخلفى) مع المجال المغناطيسى الناشيء بفعل تيارات العضو الدائر.

يبين شكل (٩ ـ ٤) الدائرة المكافئة للمحرك على أساس فصل تأثير كل من المجالين الأمامى والخلفى عن بعضهما البعض ، بحيث يكون حساب تأثير كل منهما على جـــزء مستقل من الدائرة المكافئة فى القطاع الخاص منها بالعضو الدائر . وعندما يكون العضو الدائر فى حالة السكون، فإنه يتأثر بطريقة مماثلة من كل من المجالين، لأنهما متساويان ويدوران بنفس سرعة التزامن فى اتجاهين متضادين. لذلك نجد أن الجزء الخاص بكل من المجالين يشبه الآخر فى الدائرة المكافئة ، كما هـو مبين فى شكل (٩ ـ ٤ ا) . ونظراً لأن الفيض المغناطيسى الخاص بكل من المجالين الأمامى والخلفى يساوى نصف الفيض المغناطيسى



شكل (٩ ـ ٤ ا)

للمجال الأصلى المتردد ، فان الثوابت في كل من جـــزءى الدائرة المكافئة تساوى نصف الثوابت فى القطاع الخاص بالعضو الدائر من الدائرة المكافئة الأصلية.

وعندما يصل المحرك إلى سرعة الدوران المعتادة، n ،يكون المجال الامامى دائراً بالسرعة n_s فى نفس الاتجاه ، أى بمعامل انزلاق S ، بينما يكـون المجال الخلفى دائراً بالسرعة $n + n_s$ فى الاتجاه المضاد ، أى بمعامل انزلاق $(2 - S)$. وهذا يعنى أن المجال الأمامى يولد تيارات وقوى دافعة كهربية في ملفات العضو الدائر بتردد sf ، بينما يكون تردد التيارات والقوى الدافعة الكهربيــة التى يولدها المجال الخلفى فى نفس الملفات $f(2 - s)$. ويترجم تأثير وصول المحرك إلى سرعة الدوران n ، فى الدائرة المكافئة، بقسمة مقامة العضو الدائر على معامل الانزلاق ، أى على s فى الجزء الخاص بالمجال الأمامى ، وعلى $(2 - s)$ فى الجزء الخاص بالمجال الخلفى ، كما هو مبين فى شكل (٩ - ب) .

يمكننا على هذا الأساس اعتبار معاوقة أمامية Z_f ومعاوقة خلفية Z_b بحيث يكون $\frac{1}{2} Z_f$ هـو معاوقة المدخل بالنسبة لجزء الدائرة المكافئة الخـاص بالمجال الأمامي ، $\frac{1}{2} Z_b$ هو معاوقة المدخل بالنسبة لجـزء الدائرة المكافئة الخاص بالمجال الخلفى . وهذا يعنى أن :

$$Z_f = \frac{\left(\frac{R_2}{s} + J X_2\right) J X_0}{\frac{R_2}{s} + X_2 + J X_0} = R_f + J X_f \qquad (٤ - ٤)$$

$$Z_b = \frac{\left(\frac{R_2}{2 - s} + J X_2\right) J X_0}{\frac{R_2}{2 - s} + J X_2 + J X_0} = R_b + J X_b \qquad (٤ - ٥)$$

$$Z_f = \frac{J X_0 R_2 / S - X_0 X_2}{R_2/S + J (X_2 + X_0)}$$

$$= \frac{\left(\frac{J X_0 R_2}{s} - X_0 X_2\right) \times \left[\frac{R_2}{s} - j (X_2 + X_0)\right]}{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_2 + X_0)^2}$$

لنفرض أن $X_2 + X_0 = X_{22}$

$$= \frac{\left(\frac{J X_0 R_2}{s} - X_0 X_2\right)\left(\frac{R_2}{s} - J X_{22}\right)}{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{22}^2}$$

$$= \frac{\frac{J X_0 R_2^2}{S^2} + \frac{X_0 X_{22} R_2}{S} - \frac{X_0 X_2 R_2}{S} + J X_0 X_2 X_{22}}{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X^2_{22}}$$

$$= \frac{S X_0^2 R_2}{R_2^2 + S^2 X_{22}^2} + j \frac{X_0 (R_2^2 + S^2 X_2 X_{22})}{R_2^2 + S^2 X_{22}^2} \qquad (٤ - ٦)$$

$$R_f = \frac{S X_0^2 R_2}{R_2^2 + S^2 (X_{22})^2} = X_0^2 \frac{\frac{R_2}{s}}{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_0 + X_2)^2}$$

$$X_{22} = X_0 + X_2$$

$$(٤ - ٧)$$

$$X_f = X_0 \frac{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2 (X_2 + X_0)}{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_2 + X_0)^2} \qquad (٤ - ٨)$$

يمكننا على نفس المنوال ، استنباط R_b ، X_b من المعادلة (٢ - ٤)

$$R_b = X_0^2 \frac{\dfrac{R_2}{(2-s)}}{\left(\dfrac{R_2}{2-s}\right)^2 + (X_2 + X_0)^2} \qquad (٤-٩)$$

$$X_b = X_0 \frac{\left(\dfrac{R_2}{2-s}\right)^2 + X_2 (X_2 + X_0)}{\left(\dfrac{R_2}{2-s}\right)^2 + (X_2 + X_0)^2} \qquad (٤-١٠)$$

مثال محلول :

Fiud the input current and mechanical power output of the $\frac{1}{4}$ HP 4 — pole, 110V , 60 HZ single phase induction motor , whose constants are given below , at a slip of 0.05

$R_1 = 1.86$ ohms $\quad X_1 = 2.56$ ohms $\quad X_0 = 53.5$ ohms

$R_2 = 3.56$ ohms $\quad X_2 = 2.56$ ohms

Core loss = 35 Watts. Friction and windage = 13.5 watts.

لحساب معاوقة المدخل للمحرك Z_i نرجع إلى شكل (٤ ـ ٩ ب) الخاص بالدائرة المكافئة للمحرك وهو دائر ، فنجد أن :

$$Z_i = Z_1 + 0.5\ Z_f + 0.5\ Z_b$$
$$= (R_1 + 0.5\ R_f + 0.5\ R_b) + j\ (X_1 + 0.5\ X_f + 0.5\ X_b) \qquad (٤-١١)$$

ولحساب كل من $0.5\ X_b$, $0.5\ X_f$, $0.5\ R_b$, $0.5\ R_f$ مباشرة نعوض فى المعادلات(٧ ـ ٤) ، (٨ ـ ٤) ، (٩ ـ ٤) ، (١٠ ـ ٤) بنصف القيمة المعطاة فى المسألة لكل من X_0 , R_2 , X_2 ، فنجد أن

$$0.5\ R_f = \frac{\dfrac{1.78}{0.05} \times (26.75)^2}{\left(\dfrac{1.78}{0.05}\right)^2 + (1.28 + 2\ .76)^2} = \frac{25.45}{2055}$$

$$= 12.4 \text{ ohms}$$

$$0.5\ X_f = \frac{26.76\ (1268 + 35.9)}{1268 + 787} = \frac{26.75 \times 1303.9}{2055}$$

$$= 16.97 \text{ ohms}$$

$$0.5\ R_b = \frac{\frac{1.78}{1.95} \times (26.75)^2}{\left(\frac{1.78}{1.95}\right)^2 + 787} = 0.83 \text{ ohm}$$

$$0.5\ X_b = \frac{26.75\left[\left(\frac{1.78}{1.95}\right)^2 + (1.28 + 26.75)\ 1.28\right]}{\left(\frac{1.78}{1.95}\right)^2 + 787}$$

$$= \frac{26.75 \times 36.73}{787} = 1.247 \text{ ohm}$$

$$Z_j = (1.86 + 12.4 + 0.83) + j\ (2.56 + 16.97 + 1.247)$$

$$= 15.09 + J\ 20.777 = 25.67 \angle 54.01^\circ$$

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_j} = \frac{110}{25.67} \angle -54.1 = 4.28 \angle -54.01^\circ$$

بتطبيق المعادلتين (٧ – ٤) ، (٨ – ٤) نجد أن :

$$0.5\ I_1^2\ R_f = (4.28)^2 \times 12.4 = 227.2 \text{ Watts} = P_{gf}$$

$$0.5\ I_1^2\ R_b = (4.28)^2 \times 0.83 = 15.2 \text{ Watts} = P_{gb}$$

بتطبيق المعادلة (١٤ – ٤) نجـد أن القدرة الميكانيكية الكلية الداخلية للمحرك هى :

$$P_m = P_g(1 - s) = (1 - s)(P_{gf} - P_{gb})$$

$$= (1 - 0.05)(227.2 - 15.2)$$

$$= 212(1 - 0.05) = 201.5 \text{ Watts.}$$

وتكون قـــدرة الخرج الميكانيكية P_0 عبارة عن P_m بعد انقاص قيمة المفقودات الميكانيكية :

$$P_0 = 201.5 - (35 + 13.5) = 153 \text{ watt}$$

$$= \frac{153}{746} = 0.205 \text{ HP.}$$

تتولد القوة الدافعة الكهربية المضادة E_{1fa} فى ملفات العضو الثابت بتأثير الفيض المغناطيسى المحصل للمجـال المغناطيسى الأمامى والمجـال المغناطيسي الناشى عن التيار الذى يولده المجال الأمامى فى ملفات العضو الدائر بالتأثير . ونظرا لأن التردد فى دائرة هـذا التيار هو sf وهو صغير جـدا ، كما أن $\frac{R_2}{s}$ تكون كبيرة بالمقارنة بـ X_2 بسبب صغير S ، فان معامـل القدرة يكون كبيرا أى يقرب من الواحد الصحيح . وهـــذا يعنى أمرين : الامر الأول أن التيار ذا الترددالصغيرالذى ينشأ بتأثيرالمجال الأمامىفىالعضو الدائر ،هو تيار فعال يعطى قدرة فعالة وعزم دوران كبير ، والأمر الثانى أن هذا التيار يعطى تبعا لذلك تأثـيرا مغناطيسيا متعامدا (cross-magnetising effect) (راجع نظريات وتصميم الآلات الكهربية صفحة ١٢٨ و ١٢٩) ممـا يجعل قيمة فيض المجال المغناطيسي الأمامى لاتتأثر إلاقليلا بفعل هذا التأثيرالمتعامد، وتصبح E_{mf} مناظرة لما يمكن أن ينتجه المجال المغناطيسي الأمامى بالتقريب.

هذا وتتولد القوة الدافعة الكهربية المضادة E_{1bn} فى ملفات العضو الثابت بتأثير الفيض المغناطيسى المحصل للمجال المغناطيسي الخلفى والمجال المغناطيسى

الناشيء عن التيار الذى يولده المجال الخلفى فى ملفات العضو الدائر بالتأثير . ونظرا لأن التردد فى دائرة هذا التيار هو f (2 — s) وهو كبير نسبيا ، كما أن $\frac{R_2}{2-s}$ تكون صغيرة بالمقارنة بـ X_2 بسبب كبر (2 — s) ، فان معامل القدرة يكون صغيرا . وهذا يعنى أمرين : الأمر الأول أن التيار ذا التردد الكبير،الذى ينشأ بتأثير المجال الخلفى في العضو الدائر هو تيار حتى (غير فعال تقريبا) يعطى قدرة فعــالة صغيرة وعزم دوران صغير ، والأمر الثانى أن هذا التيار يعطى تبعا لذلك تأثيرا مغناطيسيا مضادا(Demagnetising effect)، مما يجعل قيمة فيض المجال المغناطيسى الخلفى تتأثر كثيرا بفعل هـــذا التأثير المضاد ، وتصبح E_{1bn} أصغر كثيرا من E_{1fn} .

يمكننا الحصول على المعلومات اللازمة بالنسبة للقدرة وعــزم والدوران بتطبيق القوانين التى تحكمها، كما سبق استخدامها فى حالة المحرك ثلاثى المراحل. فاذا فرضنا أن T_f عزم الدوران الداخلي (Internal torque) بالكيلوجرام متر للمجال الأمامي ، T_b عزم الدوران بالكيلو جرام متر الداخلى للمجال الخلفى ، P_{gf} قدرة الثغرة الهوائية بالوات للمجال الأمامي ، P_{gb} قدرة الثغرة الهوائية بالواث للمجال الخلفى ؛ $\omega_s = 2\pi \frac{n_s}{60}$ سرعــة التزامن الزاوية لكل من المجالين ، نجد أن

$$T_f = \frac{P_{gf}}{\omega_s \times 9.81} \; K_{g.m.} \quad , \quad T_b = \frac{P_{gb}}{\omega_s \times 9.81} \; K_{g.m.}$$

(٤ - ١٢)

$$P_{gf} = 0.5 \; I^2_m \; R_f \quad \text{Watts} \quad , \quad P_{gb} = 0.5 I^2_m \; R_b \quad K_{g.m.}$$

(٤ - ١٣)

حيث R_f هى الجزء الحقيقى (المقاومة) في معاوقه المجال الأمامى Z_f كما تعطيها المعادلة (١ - ٤) ، و R_b هى الجزء الحقيقى (المقاومة) فى معادلة

المجال الخلفى Z_b كما تعطيها المعادلة (٢ - ٤) . ونظرا لتضاد حركة المجالين الأمامى والخلفى فان عزمى الدوران T_f , T_b يكونان متضادين ، ويكون عزم الدوران المحصل، وعزم الدوران الداخلى للمحرك، هو الفرق بينهما أي أن:

$$T = T_f - T_b = \frac{1}{\omega_s \times 9.81} \left(P_{gf} - P_{gb}\right) K_{g.m.}$$

(٤ - ١٤)

يمكننا الحصول على المفقودات النحاسية (Cu losses) فى ملفات العضو الدائر باستخدام العلاقة التى تربطها بقدرة الثغرة الهوائية، كما استخدمت فى المحرك الثلاثى ، أى أن :

المفقودات النحاسية فى العضو الدائر الناشئة عن المجال الأمامى :

$$sP_{gf} \qquad (٤ - ١٥)$$

المفقودات النحاسية فى العضو الدائر الناشئة عن المجال الخلفى :

$$(2 - s)\ P_{g_b} \qquad (٤ - ١٦)$$

المفقودات النحاسية الكلية فى العضو الدائر :

$$sP_{gf} + (2 - s)\ P_{gb} \qquad (٤ - ١٧)$$

ومن المعادلة (٥-٤) نجد أن قدرة الثغرة الهوائية الكلية P_g عبارة عن :

$$P_g = \omega_s T = (P_{gf} - P_{gb}) \qquad (٤ - ١٨)$$

وتكون قيمة القدرة الميكانيكية الكلية P_m (قدرة المخرج مضافا إليها المفقودات الميكانيكية) عبارة عن:

$$P_m = P_g\ (1 - s) = (1 - s)\ (P_{gf} - P_{gb}) \quad (٤ - ١٩)$$

$$P_m = P_{gf}\ (1 - s) + P_{gb}\ [\ 1 - (2 - s)\ ]$$

أو

$$= P_{gf}\ (1 - s) - P_{gb}\ (1 - s)$$

$$= (1 - s)\ (P_{gf} - P_{gt}) \quad (٤ - ٢٠)$$

إذا أردنا الحصول على قيمة النهاية العظمى لعزم الدوران،وقيمة معامل الانزلاق التى يحدث عندها هذا العزم،نجد أن الأمور تختلف عنها فى حالةالمحرك ثلاثى المراحل ، حيث وجدنا أن قيمة النهاية العظمى لعـزم الدوران لم تكن تتوقف على قيمة المقاومة المرحلية للعضو الدائر، بينما تتوقف في حالة المحرك احادى المرحلة . ويؤدى وجود المجال الخلفى فى المحرك احادى المرحـــلة إلى خفض قيمة النهاية العظمى لعزم الدوران، وتقليل قيمة معامل الانزلاق التي تحدث عندها هذه النهاية ، كما يؤدى وجود هذا المجال أيضا إلى خفض قيمة معامل الجودة للمحرك بسبب زيادة المفقودات النحاسية فى ملفات العضو الدائر ، وكذلك زيادة المفقودات النحاسية في ملفات العضو الثابت بسبب ارتفاع قيمة تياره . هـذا ويكون المحرك احادى المرحلة الذى يمتلك نفس مقنن القدرة والسرعة لمحرك ثلاثى المراحل اكبر حجما من هذا الأخير. وعلى الرغم من زيادة الحجم فى حالة المحرك احادى المرحلة،فان هذا لا يستتبع زيادة السعر بالضرورة فى حالة المحركات القياسية كسرية القدرة بالحصان (التى تستخدم فى الأغراض العامـــة)، وذلك بسبب الانتاج الكبير العدد من هذه المحركات.

مقياس سرعة الدوران (أو التاكومتر) العامل على تيار متردد :

(A. C. Tachometer)

وهو فى الواقع عبارة عن محرك تأثيرى ثنائى المرحـلة، يستخدم في مجال

التنظيم الآلى، عندما نحتاج إلى قياس السرعة الزاوية لعمود إدارة من خلال ضغط متردد ثابت التردد، تتوقف قيمته على هذه السرعة . ويتكون التاكومتر فى أبسط صورة من عضو ثابت يحتوى على ملفين m , a متعامدين فراغيا، وعضو دائر من نوع القفص السنجابى . ويطلق على الملف الرئيسي m اسم المجال الثابت (fixed field) أو مجال المراجع (Reference field)، ويوصل إلى ينبوع ضغط متردد ذى ضغط مناسب ثابت القيمة والتردد . ويطلق على الملف المساعد a اسم المجال المنظم (Control field)، ويمكن أن يتولد فيه ضغط له نفس تردد ضغط المجال الثابت .

ونظرا لتعامد المجالين الثابت والمنظم نتوقع أن يكون معامل التأثير المتبادل بينهما (coefficient of mutual Coupling) مساويا للصفر . وهذا صحيح عندما يكون العضو الدائر ثابتا . ففى هذه الحالة ، إذا نظرنا إلى التاكومتر على أساس مماثلته للمحرك التأثيرى احادى المرحلة ، نجد أن المجالين الأمامى والخلفى اللذين ينشئهما الملف الرئيسي m يكون تأثيراهما متساويين ومتضادين بالنسبة للملف المساعد a . هذا ويجب أن يكون مفهوما لدينا، إلى جانب ذلك، أن الملف a يكون موصلا إلى مكبر (amplifier) ذى مقاومة مدخل كبيرة نسبيا ، مما يمكننا من النظر إليه على أنه ملف مفتوح، واعتبار رد فعله على الملف الرئيسى مهملا .

عندما يكون تاكومتر التيار المتردد دائرا بسرعة معينة، يعمل الملف الرئيسي m على نمط الملف الرئيسى في المحرك التأثيرى احادى المرحلة ، فيكون له معاوقة مدخل للمجال الأمامى Z_f، ومعاوقة مدخل للمجال الخلفى Z_b . وتتولد فى هذا الملف القوة الدافعة الكهربية $E_{mf} = 0.5\ I_m Z_f$ نتيجة دوران المجال الأمامى بالنسبة له فى نفس الاتجاه ، كما تتولد فيه أيضا القوة الدافعة الكهربية $E_{mb} = 0.5\ I_m Z_b$ نتيجة دوران المجال الخلفى بالنسبة له فى عكس الاتجاه . فاذا كانت النسبة بين عدد اللفات الفعالة بين الملف المساعد a إلى عدد

اللفات الفعالة فى الملف الرئيسى m هو N [عدد اللفات الفعـالة هو حاصل ضرب عدد اللفات فى معامل اللف ($\frac{K_{wa} \quad T_a}{K_{wm} \quad T_m}$)] نجد أن القوة الدافعة الكهربية المتولده في الملف m بفعل المجال الأمامى هى :

$$E_{af} = J\ NE_{mf} = J\ N\ I_m \times 0.5\ Z_f \qquad (٤ - ٢١)$$

وهذا يعنى أن E_{af} متقدمة على E_{mf} بزاوية مقدارهـا $\frac{\pi}{2}$ ، والسبب فى ذلك هو أن الملف α متخلف بزاوية فراغية مقدارها $\frac{\pi}{2}$ عن الملف m ، فيكون مرور المجال الأمامى عليه أثناء دورانه قبل مروره فى الملف m بما يعادل هذه الزاوية، فينتج فى الملف α قوة دافعة كهربية متقدمة عن تلك التى تنتج فى الملف m بزاوية $\frac{\pi}{2}$ •

ونظرا لأن المجال الخلفى يمر أثناء دورانه على الملف m بما يعادل الزاوية $\frac{\pi}{2}$ قبل مروره على الملف α ، تكون القوة الدافعـة الكهربية المتولدة فى الملف α متخلفة عن القوة الدافعـة الكهربية المتولدة فى الملف m ، فنجد أن العلاقة بين E_{ab} و E_{mb} هى

$$E_{ab} = -\ j\ NE_{mb} = -\ j\ N\ I_m \times 0.5\ Z_b \qquad (٤ - ٢٢)$$

وتكون القوة الدافعة الكهربية المحصلة المتولدة فى الملف α بفعل المجالين الأمامى والخلفى هى :

$$E_a = \tfrac{1}{2}\ j\ N\ I_m\ (Z_f - Z_b) \qquad (٤ - ٢٣)$$

عندما يكون العضو الدائر فى التاكومتر ساكناً فان $Z_b = Z_f$ ويكون الضغط

المتولد على طرفى الملف a مساويا للصفر . وكلما ازدادت سرعة العضو الدائر، تكبر قيمة Z_f وتقل قيمة Z_b ،بحيث يكون الفرق بينهما متناسبا مع السرعة ، وتصبح القوة الدافعة الكهربية E_a المأخوذة من الملف a أيضا متناسبة مع السرعة ، وهو الأساس فى طريقة عمل التاكومتر كما سبقت الاشارة إليه .

المحرك التأثيرى ثنائى المرحلة : The two phase induction motor

تحتل مجارى العضو الثابت فى هذا المحرك مجموعتان من الملفات ، تكون كل مجموعة منها مرحلة قائمة بذاتها ، وتكون مجارى كل مجموعة متعامدة فراغيا مع مجارى المجموعة الأخرى ، أى يفصل بينهما زاوية فراغية (space angle) مقدارها $\frac{\pi}{2}$ أو ٩٠° (راجع الملفات ثنائية المراحل فى كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية صفحة ٣٨) . وتوصل كل مجموعة من الملفات إلى مرحلة من مرحلتى ينبوع ثنائى المرحلة (Two phase supply). وعندما يكون هذا الينبوع متزنا (balanced)، فان الضغط فى المرحلتين يكون متساويا ، وتقع بينهما زاوية اختلاف مرحلى زمنية (time phase angle)

مقدارها $\frac{\pi}{2}$ أو ٩٠° درجة أيضا، وفى هذه الحالة يتكون مجال مغناطيسى دائر ذو اتساع متغير ، بخلاف المجال المغناطيسى الدائر فى حالة المراحل الثلاثية، الذى يكون ثابت الاتساع . وإذا كان طول الضغط المرحلى المتساوى هو V ، فانه يمكن التعبير عن الضغط المتزن فى المرحلتين V_2 و V_1 على النحو التالى :

$$V_1 = V \quad , \quad V_2 = j\,V \qquad (٤-٢٤)$$

أما إذا كان الينبوع غير متزن ، بان يكون الضغط فى المرحلة الأولى V_1 مختلفا فى الطول عن الضغط فى المرحلة الثانية V_2 ، وكانت الزاوية بينهما مختلفة عن ٩٠ درجة ، فان خير ما نفعله فى هذه الحالة هو استخدام المركبات

المتماثلة للحصول على مجموعتين من المركبات ، وهى مجموعة مركبات التعاقب المرحلي الموجب ، ومجموعة مركبات التعاقب المرحلى السالب . ومن الواضح أن مجموعة مركبات التعاقب المرحلى الموجب تحتوى فى هذه الحالة على مرتحلين (2 phasors) طول كل منهما V_p والزاوية بينهما ٩٠° ، يكون V_{p2} متقدما بها على V_{p1} (مجموعة ثنائية متزنة ذات تعاقب موجب على نمط المجموعة الثلاثية المتزنة ذات التعاقب الموجب)، كما أن مجموعة مركبات التعاقب المرحلى السالب تحتوى على مرتحلين طول كل منهما V_n والزاوية بينهما ٩٠ درجة أيضا ، ولكن يكون V_{n2} متأخرا بها على V_{n1} .

$$V_1 = V_{p1} + V_{n1} \quad , \quad V_2 = V_{p2} + V_{n2}$$

$$V_{p1} = V_p \quad , \quad V_{p2} = j\,V_p$$

$$V_{n1} = V_n \quad , \quad V_{n2} = -\,j\,V_n$$

$$V_1 = V_p + V_n \quad , \quad V_2 = j\,V_p - j\,V_n \qquad (٤ - ٢٥)$$

ويمكن الحصول على كل من V_p و V_n بدلالة V_2 و V_1 (وهما المعطيان غالباً فى الأصل) بعمل التحويلات الرياضية اللازمة على نحو مماثل لما فعلناه فى المراحل الثلاثية فنجد أن :

$$V_p = \tfrac{1}{2}\,(V_1 - j\,V_2) \quad , \quad V_n = \tfrac{1}{2}\,(V_1 + j\,V_2) \qquad (٤ - ٢٦)$$

ونستطيع أن نحصل على العلاقات الخاصة بالتيارين I_2 , I_1 ،ومجموعتى التعاقب المرحلى لهما بطريقة مماثلة ، فنجد أن :

$$I_1 = I_p + I_n \quad , \quad I_2 = j\,I_p - j\,I_n \qquad (٤ - ٢٧)$$

$$I_p = \tfrac{1}{2}\,(I_1 - j\,I_2), \quad I_n = \tfrac{1}{2}\,(I_1 + j\,I_2) \qquad (٤ - ٢٨)$$

وتساعد هذه العلاقات عادة فى التحليلات الخاصة بتشغيل محركات التحكم ثنائية المرحلة (Two phase Control motors) .

مثال محلول :

A Small 2 - phase , 2 pole induction motor has the following constants in the main winding at 60 HZ :

$R_1 = 357$ ohms , $X_1 = X_2 = 50$ ohms

$R_2 = 255$ ohms , $X_0 = 920$ ohms

The main and auxiliary Windigs have the Same number of turns. This motor is used as a tachometer with 60 HZ reference Voltage applied to its main Winding Compute the speed voltage sensitivity in volts output / voltinput / radian pen sec. near zero speed. Also Compute the phase angle of the output voltage relative to the input voltage.

يكون حل هذه المسألة باستخدام الدائرة المكافئة للمحرك التأثيري أحادى المرحلةشكل (٩ ــ ٤ ب)، وبالقوانين الخاصة بهذا المحرك التي سبق استنباطها فى هذا الشأن [المعادلات من (٣ ــ ٤) إلى (٦ ــ ٤)] ، وذلك بالنسبة للملف الرئيسى ، الذى نشير إلى عضوه الثابت بالدليل m أو 1 . ولكى نحقق شرط التواجد بالقرب من سرعة الصفر (حالةالسكون) نعتبر أن معامل الانزلاق s قريب من الواحد الصحيح ونفترض له القيمة ٩ر٠، فتكون قيمة (2 — s) هى ١ر١ :

$$0.5\ R_f = \frac{127.5}{0.9} \times \frac{(460)^2}{\left(\frac{127.5}{0.9}\right)^2 + (25 + 466)^2} = 117\ 5 \text{ ohms}$$

$$0.5\ X_f = 460 \times \frac{\left(\frac{127.5}{0.9}\right)^2 + 25\ (25 + 460)}{\left(\frac{127.5}{0.9}\right)^2 + (25 + 460)^2}$$

$$= 460 \times \frac{2050 + 12125}{255050} = 58 \text{ ohms}$$

$$5\ R_b = \frac{127.5}{1.1} \times \frac{(460)^2}{\left(\frac{127.5}{1.1}\right) + (25 + 460)^2} = 98.7 \text{ ohms}$$

$$0.5\ X_b = 460 \times \frac{\left(\frac{127.5}{1.1}\right)^2 + 25\ (25 + 460)}{\left(\frac{127.5}{1.1}\right)^2 + (25 + 460)^2}$$

$$= 460 \times \frac{13440 + 12125}{248440} = 47.5 \text{ ohms}$$

$$Z_i = Z_1 + 0.5\ Z_f + 0.5\ Z_b = (R_1 + 0.5\ R_f + 0.5\ R_b)$$

$$+ j\ (X_1 + 0.5\ X_f + 0.5\ X_b)$$

$$= (357 + 117.5 + 98.5) + j\ (50 + 58 + 47.5)$$

$$= 573 + j\ 155.5 = 594\ \underline{|15^\circ\ 12'}$$

إذا كانت قيمة التيار فى الملف الرئيسى الموصل إلى الينبوع عند الانزلاق المعطى هى I_m ، وكانت نسبة عدد اللفات في الملفات a إلى الملفات m هى $N = 1$ كما هو معطى ، نجد أن مقدار القوة الدافعة الكهربية E_a المتولدة فى ملفات التاكومتر a هى ، على حسب المعادلة (١٨ ـ ٤) .

$$E_a = \tfrac{1}{2}\ j\ N\ I_m\ (Z_f - Z_b) = \tfrac{1}{2}\ j\ I_m\ (Z_f - Z_b)$$

$$= J\ I_m\ [(117.5 - 98.5)^2 + j\ (58 - 47.5)^2]$$

$$= j\ I_m \times 21.68\ \underline{|28^\circ\ 54'}$$

وهذا هو ما يعتبر ضغط المخرج للتاكومتر V_0 ، أما ضغط المدخل V_i فهو عبارة عن $I_m\ Z_i$ ، وبذلك نجد أن الحساسية المطلوبة لنسبة ضغط المخرج إلي ضغط المدخل في هذا التاكومتر، لكل درجة نصف قطرية (per radian/sec)، عبارة عن :

$$\frac{V_0}{V_i} \times \frac{1}{\omega} = \frac{I_m\ (Z_f - Z_b)}{I_m \times Z_i} \times \frac{1}{\omega}$$

$$= \text{Sensitivity required}$$

$\omega = \omega_s (1 - S)$, $\omega_s = 2\pi f = 100\pi$

$\omega = 100\pi \times 0.1 = 10\pi$

$$\text{Sensitivity} = \frac{21.68}{594 \times 10\pi} = 0.00116$$

phase angle between V_0 and V_i $= 90 + 28° 54' - 15° 12'$

$= 103° \ 42'$

وذلك لأن :

$V_0 = j\ I_m \times 21.68 \ \underline{|84° \ 25'} = 21.68\ I_m \ \underline{|90 + 28° 54'}$

الباب الخامس

تصميم المحركات التأثيرية ثلاثية المراحل

Design of 3 – phase Induction Motors

يتم تصميم المحركات التأثيرية ثلاثية المراحل على نفس المنوال ، وباتباع خطوات مشابهة لتلك التي سبق شرحها في حالتي الآلات المتزامنة وآلات التيار المستمر . ولا تختلف فلسفة التصميم في هذه الحالة عما سبق شرحه أيضا من حيث ضرورة الحصول على مستوى جيد لأداء الآلة ، باعتبار منحنيات خواص تشغيلها ، مع مراعاة أن تكون تكاليف انتاجها، وتشغيلها على مدى عمرها ، بأقل قيمة ممكنة . ويستوجب ذلك ، كما سبق أن رأينا، تحديد قيمة مناسبة لكل من الحمل النوعي الكهربي ، والحمل النوعي المغناطيسي، على أساس الخبرات السابقة في مجال تصميم هذه الآلات ، حيث يمكن ، بناء على ذلك ، تحديد الأبعاد الرئيسية للآلة ، باستخدام المعادلة التي تربط بين كل هذه المتغيرات . وهذه المعادلة تشبه في تكوينها المعادلتين المناظرتين ، اللتين سبق أن استنبطناهما في حالتي الآلات المتزامنة ، وآلات التيار المستمر ، ونستطيع أن نستنبطها بنفس الاسلوب .

(١ ـ ٥) حساب الابعاد الرئيسية للمحرك :

نفرض أن المطلوب تصميم محرك تأثيري ثلاثي المراحل،ذي قدرة مخرج معينة بالحصان نرمز إليها بالرمز HP . إذا تذكرنا ما سبق أن قلناه في مناسبة سابقة،من أن العضو الثابت للمحرك التأثيري لايفترق في ملامحه الرئيسية عن العضو الثابت للمحرك المتزامن، ندرك على الفور أننا نستطيع بكل تأكيد الإستفادة من المعادلات والوسائل الخاصة بتصميم المحرك المتزامن، مما يسهل علينا كثيرا من

الأمور فى هذه الحالة . وهذا يعنى أننا نستطيع الإستفادة من المعادلة (١ ــ ٦) الخاصة بإيجــاد الأبعاد الرئيسية للالة المتزامنة (صفحة ٢٩٠ كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية) وذلك بعد إيجـاد KVA_i بدلالة HP ، مع تحديد معامل القدرة ومعامل الجودة للمحرك ، باللجوء إلى التصميمات السابقة، حيث نجد أن :

$$KVA_i = \frac{HP \times 0.746}{\eta \times \cos\phi} = 0.183\ AC \times B_a \times k_w \times 10^{-11} \times D^2\ l_i \times n_s$$

$$\frac{HP}{n_s} = 0.245\ AC \times B_a \times \eta \times \cos\phi \times k_v \times 10^{-11} \times D^2\ l_i$$

$$= C_0\ D^2\ l_i \qquad (٥ - ١)$$

$$C_0 = 0.245\ AC \times B_a \times \eta \times \cos\phi \times k_w \times 10^{-11} \qquad (٥ - ٢)$$

C_0 هو ثابت المخرج للآلة ، ويتطلب حسابه معرفـــة قيمة كل من k_w , $\cos\phi$, η , AC , B_a مسبقا ، لكى يمكن الحصول على قيمة $D^2\ l_i$ الخاصة بالآلة . ويتم الحصول على قيمة C_0 أو تحديد القيم المطلوبة لحسابها باستخدام المنحنيات التى تعطى قيمة كل منها، كما تم الحصول عليها فى آلة مشابهة سبق تصميمها، وتعمل بصورة مرضية . وهذا هو ما نطلق عليه اللجوء إلى الخبرة السابقة (previous practice) . ولـكل مصنع ، بطبيعة الحال ، خبرته الخاصة به ، ومنحنياته التى يحصل عليها فى هذا السبيل . وتتنوع هذه المنحنيات على حسب المتغيرات الرئيسية فى الآلة ، وبخاصة عدد الأقطاب . وفيما يلى نعطى مجموعات القراءات التى يمكن الإستعانة بها لرسم بعض هـذه المنحنيات ، وعندما لاتفى هذه المنحنيات بضالتنا المنشودة بالضبط نلجأ إلى

استنباط المنحنى المطلوب باستخدام أقرب المنحنيات إليه ، وذلك بتطبيق الطرق الرياضية المعروفه فى هذه المضمار والتى يطلق عليها الاستقطاب الداخلى أو الممتد (interpolation or extrapolatin) فى حالة المحركات ذات السرعات العالية (عدد صغير من الاقطاب) يمكن الحصول على كل من منحنى معامل القدرة ومعامل الجودة عند قدرات الخرج المختلفة بالحصان الفرملى من الجدول الآتى .

القدرة	صفر	٥	٢٠	٤٠	٨٠	١٢٠	١٦٠	٢٢٠
معامل القدرة	صفر	٠ر٨٩	٠ر٩٢	٠ر٩٣٥	٠ر٩٤	٠ر٩٤٥	٠ر٩٤٨	٠ر٩٥
معامل الجودة	صفر	٠ر٨٩	٠ر٩١	٠ر٩٢	٠ر٩٣٥	٠ر٩٤٢	٠ر٩٤٨	٠ر٩٥

والجدول الآتى يعطى القيم المعتادة عند السرعات المتوسطة (عدد متوسط من الاقطاب) .

القدرة	صفر	٥	٢٠	٤٠	٨٠	١٢٠	١٦٠	٢٢٠
معامل القدرة	صفر	٠ر٨٤	٠ر٨٧	٠ر٨٩	٠ر٩	٠ر٩٠٥	٠ر٩١	٠ر٩١٥
معامل الجودة	صفر	٠ر٨٦	٠ر٨٨	٠ر٩	٠ر٩١٥	٠ر٩٢٥	٠ر٩٣	٠ر٩٣

والجدول الآتى يعطى القيم عند السرعات المنخفضه (عدد كبير من الاقطاب) .

القدرة	صفر	٥	٢٠	٤٠	٨٠	١٢٠	١٦٠	٢٢٠
معامل القدرة	صفر	٠ر٧٤	٠ر٧٨	٠ر٨	٠ر٨٢٥	٠ر٨٣٥	٠ر٨٤	٠ر٨٤٥
معامل الجودة	صفر	ر٧٥	٠ر٨	٠ر٨٢٥	٠ر٨٣	٠ر٨٧	٠ر٨٨	٠ر٨٨٥

هذا وتجدر بنا الاشارة ، بهذه المناسبة ، إلى أننا نسلك هنا سبيلا تعليميا محضا، بمعنى أننا نهدف إلى تعليم الطالب النظريات الأساسية الخاصة بطرق التصميم . أما فى الحياة العملية ، فان الإستفادة من التجارب والخبرة السابقة تؤدى إلى انتهاج سبل خاصة في الحصول على الآلة ذات الابعاد والملامح المناسبة ، دون التقيد بالتفصيلات النظرية لطرق التصميم المستنبطة بالاسلوب العلمى . مثال ذلك اللجوء إلى تحديد اطارات قياسية (Standard Frames) للآلة، وهى عبارة عن نماذج من الحديد خاصة بالعضوين الثابت والدائر، ذات ابعاد وملامح متنوعة تنوعا شاملا ، بحيث يمكن فى العادة تحديد واحد من هـذه الاطارات ، وتوفيق الملفات على كل من العضوين الثابت والدائر ، لكى نحصل فى النهاية على الآلة المطلوبة . وبديهى أن الآلات الحاسبة الالكترونية تقوم الآن ، فى هذا المضمار ، بدور كبير . ولكن لاشك أن البرامج التى يلزم اعدادها ، لكى يمكن للآلات الحاسبة الالكترونية أن تعطى بها النتائج الصحيحة ، تستلزم إلى جانب الخبرة بفن استخدام هذه الآلات ، معرفة دقيقة بطرق التصميم الأساسية ، واسلوب التحكم فى متغيراتها، للحصول على أحسن النتائج ، وهو ما نهدف إليه أساسا من تعليم النظريات الخاصة بالتصميم . وسنرى فى نهاية الجزء ، الذى سيتناول حل مسائل التصميم على الحاسبات الالكترونية في نهاية هذا الباب ، أن إعداد هذه البرامج يحتاج إلى إعادة تنظيم معادلات وعلاقات التصميم بحيث تقل المتغيرات فيها إلى أقل عدد ممكن . وهذا يستلزم بطبيعة الحال اجادة فن التصميم مسبقا، بالطرق التقليدية. فى الآلات الصغيرة نجد أن قيمة AC تكون حوالى(200 amp-cond/cm) وقيمة B_a تكون حوالى 5000 جاوس و $k_w = 0.96$. وتكون قيمة $\cos\phi$ حوالى 0.7 وقيمة η حوالى 0.7 .

وفى الآلات الكبيرة تصل هذه القيم إلى :

$$AC = 550 \ , \ B_a = 5700 \ , \ k_w = 0.92 \ , \ \cos\phi = 0.9 \ ,$$
$$\eta = 0.9$$

وكما سبق ذكره يمكن الحصول على القيم المطلوبة بالرجوع إلى الآلات التى سبق تصميمها،على أساس الفروض المعطاة بالنسبة للآلة الجديدة .

لكى يمكن فصل D عن l_i من القيمة $D^2 l_i$ التى نحصل عليها من المعادلة (١ ــ ٥) نستعين ، كما سبق أن فعلنا فى آلات التيار المستمر والآلات المتزامنة ، بقيمة مناسبة للنسبة $\frac{l_i}{\tau_p} = \lambda$ ، حيث τ_p هى الخطوة القطبية المحرك . وتتغير قيمة هذه النسبة على حسب حجم المحرك وسرعته، وتكون بالتقريب كما يلى :

فى المحركات الكبيرة ذات السرعات المنخفضة $\lambda = 1.0 \rightarrow 2.0$

فى المحركات الكبيرة ذات السرعات المرتفعة $\lambda = 0.9 \rightarrow 1.8$

فى المحركات الصغيرة التى تصل قدرتها إلى مائة حصان تقريبا

$\lambda = 0.6 \rightarrow 1.0$

بعد الحصول على كل من قطر الآلة D وطولها l_i يقسم الطول l_i الى اجزاء تكون بينها فتحات التهوية على نفس المنوال كما فعلنا فى الآلة المتزامنة (راجع كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية صفحة ٢٩٤) .

(٥ ــ ٢) اختيار عدد المجارى وتصميم الملفات :

كما هو الحال فى الآلات المتزامنة يستخدم نوعان من المجارى ، وهى المجارى المفتوحة (open slots) ، والمجارى نصف المغلقة (Semi - closed) (راجع كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية صفحة ٢٩٥) . وعموما فان المجارى نصف المغلقة تستخدم مع الآلات الصغيرة والآلات متوسطة الحجم،عندما يكون الضغط منخفضا . ويمكن استخدام المجارى المفتوحة فى الآلات الكبيرة وعندما يكون الضغط عاليا (يزيد على ٣٠٠٠ فولت) . ويكون لف العضو الثابت باحدى الطرق الآتية :

(أولا) أن تعد الملفات على هياكل (fromers) مناسبة ، ويتم اسقاطها في المجرى بدفع موصل بعد الآخر من خلال الفتحة نصف المغلقة .

(ثانيا) سحب السلك داخل المجرى ، ثم ترتيب الاسلاك معا في ملفات .

(ثالثا) اعداد الملفات على هياكلها ، ثم اسقاط الملفات بزيها في المجارى المفتوحة (open slots) .

ويتم تحديد عدد اللفات في المرحلة الواحدة للعضو الثابت $T1_{ph}$ من معادلة القوة الدافعة الكهربية ، ثم يحدد عدد الموصلات في كل مجرى باعتبار أن عدد الموصلات الكلية في العضو الثابت عبارة عن $Z_1 = 6\ T_{ph}$ ،وذلك بعد تحديد عدد المجارى،هذا ويتوقف عدد الموصلات الكلى على ضغط الآلة ، وطريقة توصيل الملفات في العضو الثابت نجمة أودلتا . ففى الآلات التي تستخدم ضغطا عاليا وتكون قدرتها صغيرة نجد أن توصيلة الدلتا تحتاج إلى حوالي ٧٣٪ زيادة في عدد الموصلات عن توصيلة النجمة المناظرة . ولكن توصيلة الدلتا تتيح استخدام مفتاح نجمة دلتا لبدء الآلة في هذه الحالة . لذلك فان الاتجاه ينحو إلى استخدام توصيلة الدلتا مع الضغوط المنخفضة ٢٢٠، ٣٨٠ ، ٥٠٠ فولت ، بينما قد يفضل استخدام توصيلة نجمة مع الضغط ٣٨٠ فولت ، حتى يمكن تشغيل الآلة بنفس القدرة على ضغط ٢٢٠ فولت، بعد تحويل توصيلها إلى دلتا .

هذا ويندر بالنسبة للآلات الكبيرة ذات الضغوط المرتفعة استخدام توصيلة الدلتا ، وحينئذ فإن توصيلة النجمة هي السائدة في هذه الحال ، لكى لا تنخفض قيمة معامل الملء للمجرى بسبب ازدياد عدد الموصلات، وبالتالى ازدياد مقدار المواد العازلة في المجرى (معامل الملء في المجرى هو نسبة مساحة النحاس الكلية في المجرى إلى مساحة فراغ المجرى) . وهذا هو

أحد الأسبـاب الرئيسية الداعية إلى الاتجـاه إلى استعمال وسائل بدء أخرى غير مفتاح نجمة دلتا .

(٣ ـ ٥) عدد المجارى على العضو الثابت :

يكون تحديد عدد المجارى فى العضو الثابت (المنتج) على أساس اختيار عدد مناسب من المجارى لكل قطب ولكل مرحلة ، وهو الذى نشير إليه دائما بالرمز q_1 (Slots / pole / phase) . وتكون قيمة q_1 عادة مابين ٣ ، ٤ . ونحاول على قدر الإمكان تجنب القيمة ١ أو ٢ . ويمكن زيادة قيمة q_1 عن ٤ فى الآلات التى تكون فيها قيمة القدرة لكل قطب كبيرة ، وتكون أقصى قيمة لـ q_1 هى ٩ فى الآلات الكبيرة التى يكون عدد أقطابها اثنين فقط . هذا ويمكن المراجعة على قيمة q_1 المختارة بإيجاد قيمة خطوة المجرى (Slot pitch) τ_{s1} التى تتراوح عادة مابين ٢ ، ٣ سم فى الآلات ذات الضغط المرتفـع . ويمكن أن تتراوح هـذه القيمة بين ٥ر١ ، ٢ سم فى الآلات ذات الضغط المنخفض والخطوة القطبية الصغيرة . وعموما تقع القيمة الشائعـة ما بين ٢ ، ٥ر٢ سم . ويكون ايجاد τ_{s1} على نفس المنوال كما فعلنا فى آلات التيار المستمر والآلات المتزامنة ($\tau_{s1} = \frac{\pi D}{S_1}$ حيث S_1 عدد المجارى فى العضو الثابت ويساوى q_1 6p)

(٤ ـ ٥) أبعاد المجرى والملفات:

يكون تصميم المجرى في العضو الثابت على أساس ما يحتويه من موصلات $\frac{z_1}{s_1}$ ، وذلك بفرض قيمة مناسبة لـكثافة التيار δ التى تتراوح بـين ٣ و ٦ أمبير لكل ملليمتر مربع ، على حسب كفاءة التهوية فى الآلة وقيمة AC ، بحيث لا تتعدى قيمة حاصل ضرب AC فى كثافة التيار الحد الذى سبقت الإشارة اليه في حالة الآلات المستمرة والمتزامنة ، وهو فى هذه الحالة ٢٠٠

نحصل على مساحة مقطع الموصل بقسمة قيمة التيار المرحلى على كثافة التيار . ويتحدد شكل المقطع إما مستدير إذا استطعنا الحصول على سلك قياسي مستدير المقطع (standard wire guage) ، بحيث لا يزيد قطر السـلك عن ٣ مم عادة، لكى يمكن ثنيه وتشكيله باليد، أو يكون المقطع مستطيلا ، وتتحدد أبعاده بنفس الطريقه التى اتبعت فى حالات الآلات المتزامنة.

فاذا كان المقطع مستديراً يزاد قطر الموصل بعازله من ١ر٠ إلى ١٥ر٠ مم كزيادة محتملة نتيجة لتشريب الملفات بالورنيش ولمقابلة فرق حسابات التصميم ولسهولة نزول الملفات فى المجارى والفضفضة . وفى حالة الأسلاك ذات المقطع المستطيل تكون الزيادة فى كل من بعدين من ٤ر٠ إلى ٦ر٠ مم نتيجـة للفه بالعازل ، ثم يزاد ما قيمته ١٤ر٠ مم تقريباً لـكل من البعـدين، لنفس الأسباب السابقة.

نحصل على أبعاد المجرى بعد ترتيب الموصلات المعزولة فى المجرى وعمل بطانة للمجرى بسمك من ١ر٠ إلى ١٥ر٠ مم من عازل الميكانيت ، وذلك فى حالة الملفات الجاهزة المعدة مسبقاً على هيكل (Formed Coils) ، حيث تكون هذه الملفات معزولة عزلا جيدا قبل وضعها فى المجارى .

أما بالنسبة للملفات المستخدمة فى الآلات الصغيرة ذات الضغط المنخفض، حيث يتم ربط اللفات معاً دون النظر إلى عزلها ، وكـذلك فى حالة الملفات اليدوية (أى التى تشكل يدوياً بدون استخدام هيكل)، فان بطانة المجرى تكون أكـثر سمكا من ذلك ، وتتراوح ما بين ٥ر٠ إلى ٨ر٠ مم

يتم تحديد أبعاد المجرى بطريقة حسابية فى حالة الملفات الهيكلية ، كما سبق أن فعلنا فى حالة الآلات المتزامنة والآلات المستمرة ، حيث يكون بعد جانب الملف المعزول محددين تماماً .

أما فى حالة الملفات اليدوية التى تتكون من أسلاك مستديرة حيث يتم اسقاط

الاسلاك داخل المجارى موصلا بعد موصل من خلال الفتحة نصف المغلقة ، فتتبع الطريقة الآتيـة : يرسم المجرى بالشكل المقترح بمقياس رسـم كبير (١٠ : ١ عادة) وترسم البطانة للمجرى بزيادة ١٠٪ فى سمكها، ثم ترسم مقاطع الموصلات المعزولة داخل المجرى بزيادة ١٥ر مم (٥ر١ مم فى الرسم) فى قطر كل منها، بحيث تملأ المجرى دون فراغات . ونظراً لأننا لا نتوقع أن أن يكون ترتيب الأسلاك الحقيقى فى المجرى مطابقاً تماماً لما جاء فى الرسم ، يجب ترك فراغا مقداره من ١ إلى ٢ مم (١٠ إلى ٢٠ مم فى الرسم) لتغطية الاختلاف المرتقب . أما فى حالة سحب الأسلاك داخل المجرى واحداً بعد الآخر، فان ذلك يجرى بعد ملء المجرى بأعواد من الخشب يناظر كل عـود منها أحد الموصلات بحيث يتم سحب أحد الأعواد ، وإدخال أحد الموصلات وراءه مباشرة لكى يحل محله . وفى هذه الحالة يمكننا أن نطمئن إلى الاستفادة من فراغ المجرى بأ كمله فى استيعاب الموصلات.

ويلاحظ أن فتحة المجرى يجب أن تسمح فى هذه الحالة بمرور السلك مع وجود بطانة المجرى، لذلك يكون عرض فتحة المجرى مساوياً لقطر السلك المعزول بالإضـافة إلى ضعف سمك عازل بطانة المجرى، مع زيادة من ٣ر٠ إلى ٥ر٠ مم .

هذا وفى حالة الملفات التى يتم اسقاط موصلاتها فى المجرى يمكن أن يكون الملف من النوع ذى الطبقتين (Douple layer winding) ، أما فى حالة الملفات التى يتم سحب موصلاتها داخل المجرى ، فانها تكون عادة من النوع ذى الطبقة الواحدة (Single layer winding) . ولذلك فان النوع الأول من الملفات يمتاز عن هذا النوع الأخير بانها يمكن أن تكون ملفات وترية ذات طبقتين (Double layer chorded winding) . وهى تستخدم فى الآلات الصغيرة عندما يكون المجرى محتوياً على عدد كبير من الاسلاك الرفيعة . كما

يفضل استخدام هذا النوع من الملفات أيضاً فى العضو الدائر ذى الحلقات

الانزلاقية لامتيازها من الناحية الميكانيكية ، حيث يمكن استخدامها بدون رءوس الملفات . وتستخدم جميع هذه الملفات مع الضغوط المنخفضة فقط .

تستخدم الملفات نصف المجهزة (half formed coils) فى الآلات ذات الضغط المرتفع عندما تكون المجارى نصف مقفلة (semi - closed) ، وهذا يكون على سبيل المثال فى حالة العضو الدائر ذى السرعة المنخفضة . وكذلك عندما تكون قيمة القدرة لكل قطب صغيرة فى الآلات التى يكون فيها طول الثغرة الهوائية كبيراً ، نتيجة للاعتبارات الميكانيكية ، ولا يمكن زيادة طولها الفعال أكثر من ذلك (عند استخدام المجارى المفتوحة).

تستخدم الملفات الجاهزة (الهيكلية أو المعدة على هيا كل) غالباً عندما يكون اللف من النوع مزدوج الطبقة (Double - layer winding). وتكون هذه الملفـــات وترية فى معظم الاحوال ، حيت تم الاستفادة من ذلك ميكانيكياً وكهربائياً .

بعد أن يتم تحديد أبعاد المجرى ، والسنة بناء على قيمة معينة للخطوة تعمل مراجعة على كثافة الخطوط المغناطيسية فى السنة ، وذلك على مقطعها المنتظم لو كانت متوازية الجانبين(parallel sided tooth) أو على مقطعها الذى يبعد بمقـــدار ثلث ارتفاعها عن أضيق مقطع فيها ، لو كان المجرى متوازى الجانبين . ولا يجب أن تزيد قيمة كثافة الخطوط فى هذه الحالة عن ١٥٠٠٠ ــ ١٦٠٠٠ جاوس.

هذا ويلاحظ أن أبعاد المجرى تتوقف فى النهاية على قيمة القطر وعدد المجارى معاً .

فبالنسبة لعمق المجرى فانه يكون صغيراً نسبياً فى المحركات بطيئة السرعة عند استخدام ملفات ذات طبقة واحدة ومجارى نصف مغلقة . ويزداد

العمق حتى يصل إلى حوالى ١٤ ملليمتراً عند استخدام ملفات ذات طبقتين ومجارى مفتوحة . أما فى المحركات ذات السرعات الكبيرة فتكون المجارى اعمق من ذلك ، وخصوصاً عندما يكون القطر كبيراً . وفى الآلات الصغيرة يتراوح عمق المجرى بين ١٥ و ٢٥ ملليمتراً ، وتكون المجارى فى أغلب الاحيان نصف مغلقة . ويغلب استعمال المجارى المفتوحة حالياً عندما يزيد القطر عن ٣٥٠ ملليمتراً . وفى حالة تساوى الاقطار نجد أن الآلات ذات الاقطاب التى تتراوح ما بين ٢و٦ تمتلك مجاري أعمق من تلك التي يتراوح عدد أقطابها من ٨ الي ١٤ .

أما بالنسبة لعرض المجرى فانه يتوقف علي خطوة المجرى . وفى العادة نخص السنة بنصف هذا العرض ، بينما يترك النصف الآخر للمجرى ، وبذلك نكون قد قسمنا الشغل بالتساوى تقريباً بين الدائرتين المغناطيسية والكهربية للآلة . ونظراً لما يعنيه وجود العازل من فقدفى الحيز بالنسبة للدائرة الكهربية ، فاننا نجعل عرض المجرى عند منتصف ارتفاعه أكبر قليلا من عرض السنة ، وبخاصة عند استخدام الملفات المجهزة .

وتتراوح قيمة نسبة ارتفاع المجرى الى عرضه بين ٣ ر ٥ عادة . هذا ويمكن الإستفادة من هذه العلاقات بتحديد قيمة مبدئية لإرتفاع المجرى ، ثم تحديد عرضه ، وبالتالى قيمة خطوة السنة τ_{s1} ، وأخيرا مقدار q_1 بمعرفة قطر الآلة .

(٥ – ٥) الثغرة الهوائية: (Air gap)

بالنسبة للخواص الكهربية للآلة يراعى أن يكون طول الثغرة الهوائية أقل ما يمكن . ذلك لأن هذا الطول إذا زاد يؤثر تأثيرا سيئا على تيار المغطسة للمحرك ، وبالتالى على معامل القدرة . أما من الناحية الميكانيكية ، فان تحديد طول الثغرة الهوائية للآلة يكون مرهونا بالأمور التى تتعلق بتكوين الآلة من

الناحية الميكانيكية ، مثل نوعية الكراسى المستخدمة مع العضو الدائر، وكذلك طول الآلة ، حيث يراعى ألا يزيد تقوس (deflection) عمود الإدارة نتيجة ارتكازه على الكرسيين عن قيمة صغيرة جـــدا، لا تزيد عن ١٠٪ من طول الثغرة الهوائية باية حال من الأحوال .

فيما يلى بعض القواعد التى يمكن تحديد الثغرة الهوائيــة δ على اساسها ، وهى تتعلق بالآلات ذات الأطوال العادية ، باعتبار جميع الابعاد بالمليمتر :

فى المحركات الصغيرة من ١ ـ ٤٠ حصان نجد أن :

(٣ ـ ٥) عندما يكون $\delta = 0.5 + \frac{D}{1000} \quad 2p = 4 \rightarrow 12$

(٤ ـ ٥) عندما يكون $\delta = 0.3 + \frac{D}{666} \quad 2p = 2$

فى المحركات المتوسطة والكبيرة الحجم (اكبر من ٤٠ حصان)

(٥ ـ ٥) عندما يكون $\delta = \frac{D}{1200}\left(1 + \frac{9}{2p}\right) \quad 2p = 2 \rightarrow 16$

وفى المحركات بطيئه الدوران عموما نجد أن :

عندما تكون $\delta = \frac{D}{1600} + 0.6 \quad 2p = 18 \rightarrow 56$

وبالنسبة للمحركات التى تكون ذات ظروف تشغيل صعبة، يمكن زيادة طول الثغرة الهوائية بمقدار ٥٠٪ . وسوف يؤدى ذلك بطبيعة الحال إلى التأثير على كل من معامل القدرة ، ومعامل الجودة أيضا ، للمحرك . هـذا ويكون الحصول على طول الثغرة الهوائية الفعـال، باستخدام معامل كارتر لكل من العضو الثابت والعضو الدائر وفتحات التهوية، على نفس المنوال كما فعلنا فى آلات التيار المستمر وآلات التيار المتردد (راجع كتاب هندسة الآلات الكهربية صفحة ٢٢٨ — ٢٣٤) .

(٦ – ٥) عدد المجارى فى العضو الدائر :

يكون اختيار عدد المجارى هو البداية فى تصميم العضو الدائر للمحرك، وهى عملية تحتاج إلى كثير من الدقة، لما يرتبط بهـا من الصعوبات الخاصة بتشغيل المحرك ، التى سبق ذكرها فى الباب الثالث، مثل ظاهرة الحبو .

وعلى العموم فان عدد المجـارى لكل مـرحلة وكل قطب q_2 فى العضو الدائر، يمكن أن ترتبط بـ q_1 بالعلاقة الآتية، فى حالة العضو الدائر ذى الحلقات الانزلاقية ، إذا أردنا تفادى الصعوبات المشار إليها:

$$q_2 = q_1 \pm 1 \quad \text{فى اغلب الاحيان}$$
$$q_2 = q_1 \pm 2 \quad \text{ونادرا ما تكون} \qquad (٦ - ٥)$$

وفى حالة المحركات ذات القفص السنجابى نجد أن القاعدة المناظرة هى :

$$q_2 = q_1 \mp \frac{2}{3} \qquad (٥ - ٧)$$

ويراعى أنه عندما يكون عدد المجارى فى العضو الثابت كبيرا، فاننا نختار الاشارة السالبة ، لتقليل عدد المجارى فى العضو الدائر ، بينما تستخدم الاشارة الموجبة عندما يقل عدد المجارى فى العضو الثابت . وعلى سبيل المثال نجد أنه

فى حالة المحركات ذات أربعة الأقطاب و $q_1 = 3$ فان عدد المجارى فى العضو الثابت يكون ٣٦ ، فنختار لذلك $q_2 = 3\frac{2}{3}$ حتى يصبح عدد المجارى فى العضو الدائر ٤٤ .

ويمكن عموما اتباع القواعد الآتية، بالنسبة للارتباط بين عدد المجارى في كل من العضوين الثابت والدائر :

١) بالنسبة لظاهرة التماسك (Cogging) يكون تفاديها بجعل الفرق بين عدد المجارى فى العضو الثابت وعدد المجارى فى العضو الدائر لايساوى بأية حال من الاحوال 6 p فى حالة المحركات ثلاثية المراحل .

٢) لتفادي ظاهرة الحبو (Crawling) يجب أن يكون الفرق بين عدد المجارى فى العضو الثابت وعدد المجارى فى العضو الدائر مساويا بأية حال من الأحوال 2p أو 4p أو 10p للمحركات ثلاثية المراحل.

٣) لتفادى الضجة فى أثناء التشغيل لا يجب أن يكون الفرق بين عدد المجارى فى العضو الثابت وعدد المجارى فى العضو الدائر مساويا بأية حال من الأحوال 1 أو 2 أو (1 + 2p) أو (2 + 2p) .

ويكون عمق المجرى فى العضو الدائر فى الغالب أقل من عمق فى العضو الثابت للآلة. ويجب أن يتراوح مجموع المساحة الكلية لمجارى العضو الدائر بين ٥٠ ٪ و ٧٠ ٪ من المساحة الكلية لمجارى العضو الثابت . ويكون معامل الملء (filling factor) فى العضو الدائر (وهو عبارة عن نسبة مساحة النحاس فى المجرى إلي مساحة المجرى نفسه) اكبر قليلا من نظيره فى العضو الثابت ، إذ يبلغ قيمته حوالى ٤٥ر٠ ، مقابل من ٣٣ر٠ إلى ٣٨ر٠ فى حالة العضو الثابت .

وتكون نسبة ارتفاع المجرى إلى خطوته وكذلك نسبة عرض المجرى إلى

خطوته أقل منها فى العضو الثابت . وتتحدد النسبة بين ارتفاع المجرى فى العضو الدائر إلى نظيره فى العضو الثابت بحوالى ٨ر. على هذا الأساس .

وعندما يكون العضو الدائر ذا قفص سنجابى (عادى أو مفرد) من النحاس، فاننا نحتاج الى حيز من المجارى يتسع لحوالى ٦٠٪ من المساحة الكلية لمقاطع الملفات النحاسية فى العضو الثابت. وتزداد هذه النسبة إلى ٢٠٠٪ عندما يكون العضو الدائر ذا قفصين من مادتى النحاس والمسنج (ذات المقاومة العالية فى القفص الخارجى). أما إذا كان القفص السنجابى المفرد من مادة الالولمنيوم وملفات العضو الثابت من النحاس فان النسبة تصل إلى ١٠٠٪ .

يبين شكل (٥ - ٥) الأشكال التقليدية لمجارى العضو الدائر ذى القفص السنجابى من النوعين المفرد والمزدوج . ويؤدى استخدام المجرى ذى الشكل المستدير احيانا إلى تقليل عرض السنة إلى درجة غير مقبولة، مما يجعل المجرى ذى الشكل البيضاوى مفضلا عليه . وتستخدم القضبان ذات الإرتفاع الكبير لزيادة عزم دوران البدء ، ويكون عرض السنة كافيا لإعطاء كثافة خطوط مغناطيسية فيها صغيرة فى هذه الحالة ، بينما تزداد كثافة الخطوط المغناطيسية تحت المجرى إلى الحد الذى يفضل معه مجارى في وضع مائل بالنسبة لنصف القطر .

هذا ويجب تجنب استخدام المجارى التى يؤدى تشكيلها إلى جعل قيمة أضيق عرض للسنة أقل من ٦ ملليمتر ، أو بجعل كثافة الخطوط المغناطيسية تزيد عن ١٨٠٠٠ إلى ٢٠٠٠٠ جاوس عند هذا العرض .

(٥ - ٧) عدد الموصلات والضغوط المستخدمة فى العضو الدائر :

تنقسم الضغوط المستخدمة فى العضو الدائر ذى الحلقات الإنزلاقية، على حسب نوع المواد العازلة المستعملة ، إلى منخفضة حتى ٨٠٠ فولت ، ومتوسطة بين ٨٠٠ و ١٣٠٠ فولت حتى ٢٢٠٠ فولت ، بين كل حلقتين فى حالة السكون.

ولا يستحب استخدام ضغوط أعلى من ٢٢٠٠ . وإذا دعت الحاجة إلى ذلك، فاننا نتجنب ظهور هذه الضغوط العالية بتقليل قيمة الضغط الموصل إلى المحرك عند بدئه بما يتناسب مع الضغط المنشود . أو قد تستخدم توصيلة دلتا فى ملفات العضو الدائر عند البدء ، ثم تحول إلى توصيلة نجمة بعد ذلك ، مما يؤدى إلى استخدام ست حلقات انزلاقية يكون الضغط بين كل اثنين منها هو الضغط المرحلى، وليس الضغط الخطي الكبير .

وبالنسبة للتيار المار في كل حلقة انزلاقية ، فانه يستحب أن يكون على قدر الإمكان أقل من ألف أمبير . وأعلى قيمة يمكن السماح بها هى ١٥٠٠ أمبير ، ويمكن فى بعض الحالات الخاصة أن تصل إلى ٢٠٠٠ أمبير . ويجب أن نتوقع أن تصادفنا فى هذه الأحوال بعض الصعوبات ، التى تتعلق بالحلقات الإنزلاقية والفرش الراكبة عليها .

ويتحدد عدد الموصلات فى العضو الدائر ذي الحلقات الإنزلاقية تبعا لقيمة الضغط المرحلي فى حالة السكون، الذى سبق تعيينه. ويتم ذلك باستخدام طريقة مشابهة لتلك التى اتبعت عند تحديد موصلات العضو الثابت ، مع ازدياد درجة المرونة فى هذه الحالة ، نظرا لأن تغيير ضغط العضو الدائر فى حدود ١٠٪ لا يستلزم عمل أية تعديلات فى جهاز البدء . وبالنسبة للآلات الكبيرة فان كل مجرى من مجارى العضو الدار يستوعب غالبا موصلين .

ويسهل على هذا الأساس تحديد عدد الموصلات بصورة مبدئية لكل مرحلة من مراحل هذا العضو، وبالتالى الضغط المرحلي . ويمكن عمل التعديلات المناسبة فى عدد الموصلات للملائمة ضغط معين عن طريق تقسيم مجموعات الملفات إلى اثنين أو ثلاثة ، وتوصيلها على التوازى ، حيث يهبط بناء على ذلك عدد الموصلات فى المرحلة الواحدة إلى النصف أو الثلث .

(٨ – ٥) عدد المجارى والقضبان فى العضو الدائر ذى القفص السنجابى :

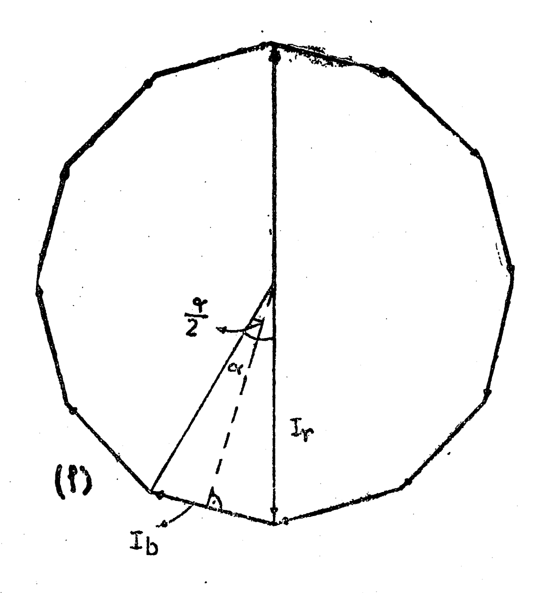
يتم تحديد عدد المجارى،فى حالة العضو الدائر ذى القفص السنجابى، بنفس الطريقة التى اتبعت فى حالة العضو الدائر ذى الحلقات الإنزلاقية . وباعتبار وجود قضيب من قضبان القفص السنجابى في كل مجرى ، يكون عـدد القضبان مساويا لعدد المجارى . ويمكن فى بعض الحالات وضع قضيب فى المجرى وترك الذى يليه فارغا ، بحيث يصبح عدد القضبان مساويا لنصف عدد المجارى فقط وفى كلتا الحالتين راعي أن يكون عـدد القضبان زوجيا ويقصر القضبان على كل من جانبيها حلقة طرفيه (end ring) ، حيث يتكون القفص السنجابى بالشكل الذى تم وصفه فى الباب الأول . وبالنسبة لحسابات القفص السنجابى لاتعتبر القضبان بهـذا الشكل متصلة على التوازى عن طريق الحلقتين ، وانمـــا تعتبر فى حقيقة الأمر متصلة على التوالى . وينشأ ذلك نتيجة لإعتبار التيار فى كل قضيب من هذه القضبان تيارا ثانويا . لذلك يتم حساب المقاومة الثانوية بجمع مقاومات القضبان جميعا ،مع مراعاة اضافة مقاومة جزء الحلقة الخاص بكل قضيب إلى مقاومة القضيب نفسه ، واعتبار المقاومة المرحلية ثلث هذه القيمة ، على اساس تصور أن كل ثلث من عدد القضبان خاص بمرحلة من المراحل الثلاث

(٩ – ٥) التيارات المارة فى القضبان وفى كل حلقة من القفص السنجابى

تختلف شدة التيار المار فى القضيب I_b عن شـدة التيار المار فى كل من الحلقتين I_r ، حيث يكون I_b اكبر I_r بصورة ملحوظة . وإذا كانت α هى الزاوية الكهربية بين كل مجريين متتالين،فان العلاقة بين هذين التيارين تكون على النحو التالى :

$$I_b = 2\, I_r \sin \frac{\alpha}{2} \qquad (٥ - ٨)$$

ويتضح ذلك من مراجعة الشكل (١ ــ ٥) حيث تمثل الاوتار فى الدائرة تيارات القضبان ويمثل نصف القطر تيار الحلقة الجانبية . فاذا اعتبرنا



(شكل ١ ــ ٥)

أن جيب الزاوية $\frac{\alpha}{2}$ يساوى قيمة الزاوية بالتقدير الدائرى ، على أساس أن α زاوية صغيرة ، وأن S_2 هو عدد المجارى (أو عدد القضبان) في العضو الدائر ، نجد أن :

$$I_b \simeq 2\, I_r \times \frac{\alpha}{2} \simeq I_r\, \frac{2p \times \pi}{S_2} \simeq \frac{2p \times \pi}{3 \times 2p \times q_2} \times I_r$$

$$\simeq \frac{\pi \times I_r}{3 q_2} \simeq \frac{1.05}{q_2}\, I_r$$

$$\text{or } I_r \simeq I_b \times \frac{q_2}{1.05} \qquad (٩ - ٥)$$

هذا ويمكن الحصول على التيار I_b على النحو التالى :

إذا افترضنا أن عدد مراحل العضو الثابت هو N_1 ومعامل اللف k_{w1}، وعدد اللفات المتصلة على التوالى فى كل مرحلة هو T_1 ، فاننا نحصل على قيمة التيار المرحلي I_2 فى العضو الدائر الذى يحتوى على عدد من المراحل N_2 من العلاقة :

$$I_2 = \frac{N_1 \; k_{w1} \; T_1}{N_2 \; k_{w2} \; T_2} \; I'_2 \qquad (١٠-٥)$$

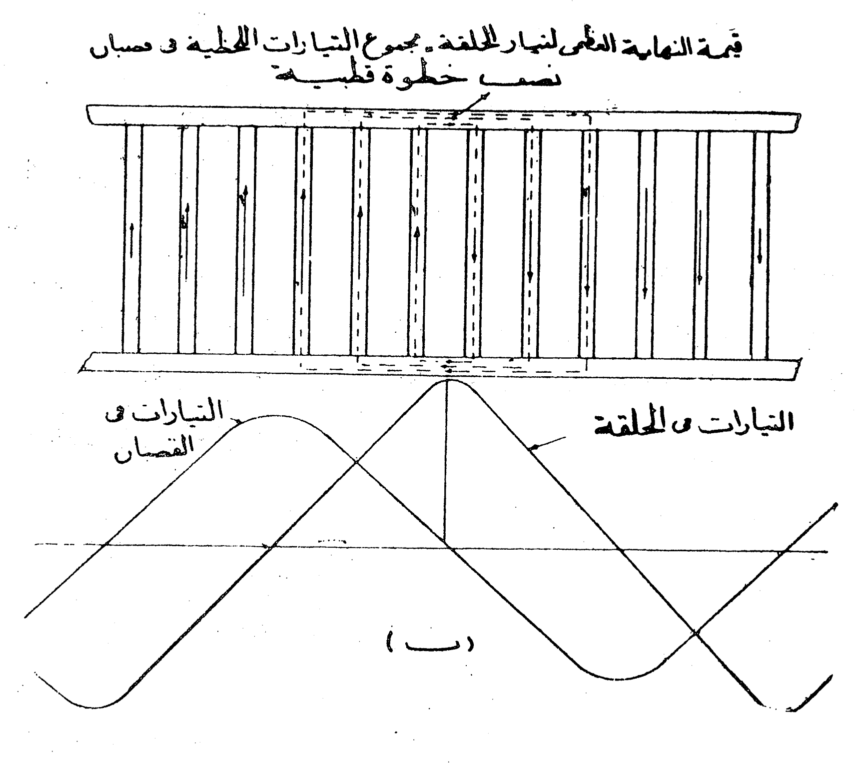
حيث I_2' هى قيمة التيار المرحلى الذى يمر فى مراحل العضو الثابت N_1، ويكون من الناحية الكهربية مكافئاً للتيار I_2 ،حين يمر في مراحل العضو الدائر التىعددها N_2.

ويعتبر العضو الدائر مكوناً من ملفات متعددة المراحل تحتوى على عدد من الموصلات أو القضبان مساوياً S_2 ، يتصل كل اثنين منها بينهما خطوة قطبية معاً ، مكونين عدداً من المراحل مقداره $\frac{S}{2}$. وتتكون كل مرحلة من لفة واحدة . ذلك لأن القضبان الواقعة تحت كل خطوة قطبية للمجال المغناطيسي الدائر تتكون فى كل منها قوة دافعة كهربية تتوقف قيمتها على موقعها من هذا المجال المغناطيسي ، كما هو واضح فى شكل (٢ ـ ٥) ا

ولتسهيل الأمور أكثر من ذلك يمكننا أن نتصور أن كل قضيب يمثل مرحلة واحدة تحتوى على نصف لفة ، وفى هذه الحالة يكون التيار I_2 هو نفسه تيار القضيب I_b ، وعلى هذا الأساس نجد أن

$$I_b = \frac{N_1 \; k_{w1} \; T_1}{(S_2/p) \times 1 \times p/_2} \; I'_2 = \frac{2 \, N_1 \, k_{w1} \; T_1}{S_2} \, I'_2 \qquad .. \; (١١-٥)$$

وذلك باعتبار أن عدد مراحل العضو الدائر فىهذه الحالة هو عددالمجارى



شكل (٢ – ٥)

أو القضبان فى خطوتين قطبيتين ، حيث يختلف التيـــار فى كل قضيب عن الآخر على مدى هاتين الخطوتين ويتكرر على نفس النمط فى كل خطوتين بعد ذلك ، واعتبار أن عدد القضبان الموصلة على التوازى فى كل مرحـــلة هو p ، فيكون عدد اللفات فى المرحلة $p/_2$. فاذا كانت g ترمز لعدد المجارى لكل قطب و zs ترمز لعدد الموصلات فى كل مجرى ، وكانت $N_1 = 3$ ، $k_{w_I} = 0.955$ ، فان $T_1 = g_1 \, p z_{s1}$ ، $S_2 = 2 \, p \, g_2$. وبالتعويض فى معادلة I_b السابقة نجد أن :

$$I_b = 0.955\left(\frac{g_1 \, z_{s1}}{g_2}\right) I'_2 \qquad (٥ — ١٢)$$

$$I'_2 = I_1 \cos \phi_1 \qquad (١٣ — ٥)$$

حيث I_1 هى قيمة التيار المرحلي في الملفات الابتدائية، ϕ_1 زاوية الاختلاف المرحلي لهذا التيار .

يتبين لنا من شكل (٣ — ٥) بأن قيمة النهاية العظمى لتيار الحلقة I_{rm} هو مجموع قيم التيارات اللحظية فى نصف عدد القضبان على مـــدى خطوة قطبية واحدة . وهذا يعنى أن I_{rm} يساوى متوسط مجموع النهايات العظمى للتيارات في هذه القضبان، أى أن:

$$I_{rm} = \frac{2}{\pi} \times \frac{1}{2} g_2 I_{bm}$$

$$I_r = \frac{g_2}{\pi} I_b = \frac{3q_2 I_b}{\pi} \simeq I_b \times \frac{q_2}{1.05}$$

$$(١٤ — ٥)$$

حيث I_b هو تيـــار القضبان الفعال و I_r هو تيار الحلقة الفعـال (جذر متوسط المربع).

وهى نفس النتيجة التى حصلنا عليها سابقاً فى المعادلة (٩ — ٥). ويلاحظ أنه إذا فرضنا أن كثافة التيار فى الحلقة تساوى كثافة التيار فى القضبان، يتحدد قطر الحلقة بما يساوى تقريباً قطر القضيب، بأخذ المعادلة (١٤ ـ ٥) فى الحسبان ، وذلك إذا كانت الحلقة مصنوعة من نفس معدن القضيب ، والا يجب أخذ اختلاف معامل التوصيل للمعدنين فى الإعتبار.

(١٠ـ٥) حساب قيمة المقاومة المرحلية للفات العضو الثابت وملفات العضو الدائر:

ينبغى فى هـــذا المجال أولا حساب طـــول القضيب

l_b ، ومتوسط طول الحلقة عند فردها ، فى حالة القفص السنجابى . وبالنسبة لطول القضيب فانه يتحدد على أساس طول المنتج l_a بزيادة تتراوح ما بين ٦٠ و ١٢٠ ملليمتر أى أن :

$$l_b = l_a + 60 \rightarrow 120 \text{ mm} \qquad (٥ — ١٥)$$

وبالنسبة لمتوسط قطر الحلقة D_r ، الذى يتحدد على أساسه متوسط طول الحلقة المفرود $l_r = \pi D_r$ فانه يكون أقل من القطر الخارجي للعضو الدائر بمقدار يساوى ما بين ارتفاع وضغط ارتفاع سنة العضو الدائر .

إذا كانت R_b هى مقاومة قضيب واحد (مع أخذ موضعى اتصال القضيب ، بكل من الحلقتين الجانبيتين فى الاعتبار) ، وكانت R_r هى مقاومة حلقة واحدة ، فان مفقودات التيار (I^2R losses) فى القفص السنجابى تكون عبارة عن

$$S_2 I_b^2 R_b + 2 I_r^2 R_r = (S_2 R_b + 2 \frac{g_2^2}{\pi^2} R_r) I_b^2$$

(٥ — ١٦)

وهذه هى نفسها المفقودات فى ملفات العضو الدائر المكافئة (الملفات عبارة عن N_1 من القضبان) وتساوى ، $N_1 I_2'^2 R_2'$. ومن ثم يمكننا الحصول على المقاومة المرحلية للقفص السنجابى R_2' منسوبة إلى الملفات الابتدائية على النحو التالى :

$$N_1 I_2'^2 R'_2 = (S_2 R_b + 2 \frac{g^2_2}{\pi^2} R_r) I_b^2$$

$$R'_2 = \frac{S_2 (R_b + R_r \frac{2 g_2^2}{S_2 \pi^2}) I_b^2}{N_1 I_2'^2} \qquad (٥ — ١٧)$$

بالتعويض عن I_b من المعادلة (١١ — ٥) وعن S_2 بما يساويها وهو $2 p g_2$ ، نجد أن :

$$\frac{2\ R_r\ g_2^2}{\pi^2\ S_2} = \frac{2}{2\ \pi^2} \times \frac{R_r\ g_2}{p} \cong \frac{0.1\ R_r\ g_2}{p}$$
(١٨ – ٥)

$$R_2' = \frac{4\ N_1\ k^2_{w1}\ T_1^2}{S_2}\ (R_b + 0.1\ R_r\ \frac{g_2}{p})$$
(١٩ – ٥)

وفى حالة العضو الثابت العادى ثلاثى المراحـل ، حيث $N_1 = 3$ ، $k_{w1} = 0,955$ ، نجد أن

$$R'_2 = 11\ \frac{T_1^2}{S_2}(R_b + 0.1\ R_r\ \frac{g_2}{p}) \qquad (٢٠ – ٥)$$

يتضح لنا من المعادلة (١٩ – ٥) أن معامل التحويل من ملفات العضو الدائر إلى ملفات العضو الثابت ، لـكى ننسب إلى هـذا الأخير ، هى $\frac{4\ N_1\ k^2_{w1}\ T_1^2}{S_2}$. لذلك نجد أن ممانعة التسرب لملفات العضو الدائر منسوبة إلى ملفات العضو الثابت X'_{20} بدلالة الممانعة الأصلية X_{20}:

$$X'_{20} = \frac{4\ N_1\ k^2_{w1}\ T_1^2}{S_2}\ X_{20} \qquad (٢١ – ٥)$$

بالنسبة للمقاومة المرحلية لملفات العضو الثابت، أو ملفات العضو الدائر ذى الحلقات الانزلاقية، فإنها تحسب من القانون $R = \frac{\rho l}{A}$. نحصل على الطول من ضرب عدد الموصلات فى المرحلة الواحدة $\frac{z}{3}$ في الطـــول المتوسط لكل موصل l_c الذى نحدده من الرسم أو مبدئياً من العلاقات التجريبية الآتية:

أ – فى حالة الملفات اليدوية (أى الملفوفة يدويا):

ملفات العضو الثابت ذات الطبقة الواحدة

$$l_c = l_a + 60 + 1.2\,\tau_p$$

ملفات العضو الدائر ذات طبقتين وترية بنسبة $\frac{٥}{٦}$

$$l_c = l_a + 34 + 0.67\,\tau_p$$

ملفات العضو الثابت ذات الطبقة الواحدة فى الآلات الكبيرة

$$l_c = l_a + 100 + 1.6\,\tau_p$$

ملفات العضو الثابت نصف المجهزة لضغط ٦٠٠٠ فولت

$$l_c = l_a + 370 + 1.7\,\tau_p$$

ملفات مجهزة ذات طبقتين

$$l_c = l_a + 2d + 2S + k + 50$$

(٥ – ٢٢)

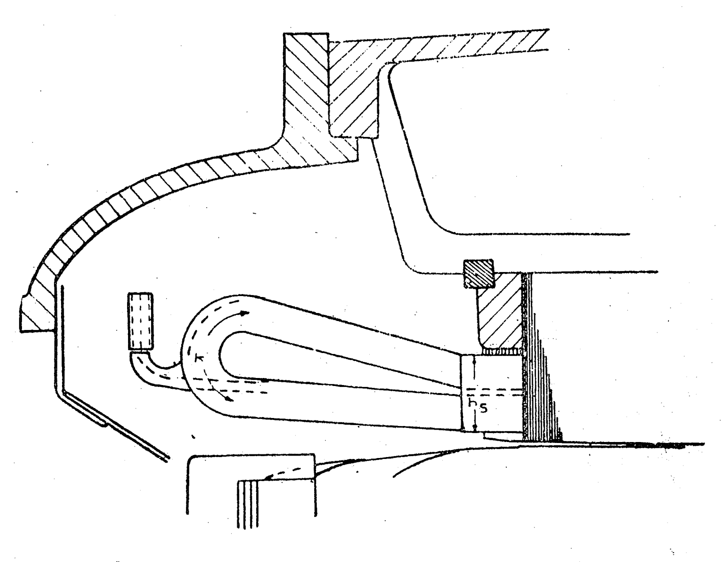
حيث l_a هو طول المنتج بما فى ذلك فتحات التهوية ، وكل الأبعاد بالملليمتر و d هو طول الجزء من الموصل خارج المجرى قبل ثنيه و S هو طول الجزء المنحنى من الموصل و k هو متوسط طول الجزء الدائرى (نصف دائرة) عند رأس الملف و τ_p الخطوة القطبية ، كما هو مبين فى شكل(٣–٥)

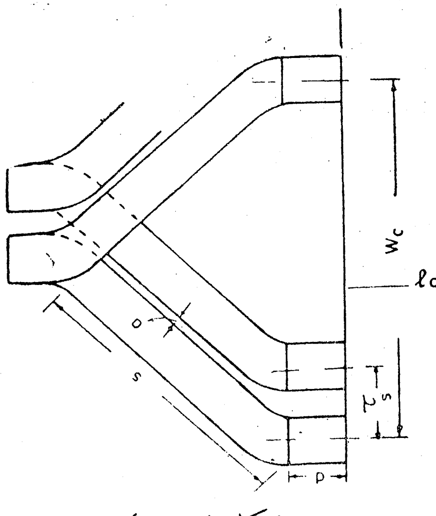
ب – فى حالة الملفات الهيكلية(Formed coils) يمكن الحصول على طول الموصل l_c من العلاقة :

$$l_c = l_a + 2d + 2S + k + 50 \text{ mm.} \qquad (٥ – ٢٣)$$

ويمكن تعديل هذه العلاقة لحساب الطول l_c على النحو التالى :

$$l_c = l + 2d + W_c \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{b_s + a}{\tau_s}\right)^2}} + \frac{\pi}{4} h_s + 50 \text{ mm.} \qquad (٥-٢٤)$$





شكل (٣ – ٥)

حيث W_c اتساع الملف ، h_s هو ارتفاع المجري ، b_s هو عرض المجرى ، τ_s خطوة المجرى ، وباقى الأبعاد كما هو مبين فى شكل(٣ – ٥)، أو كما سبق.

ولحساب طول القضيب l_b فى القفص السنجابى يمكن استخدام العلاقة:

$$l_b = l_a + 6\rho \rightarrow 120 \text{ mm.} \qquad (٥ - ٢٤)$$

ويكون قطر الحلقة الجانبية المتوسط D_r فى القفص السنجابى عبارة عن قطر العضو الدائر منقوصاً منه ارتفاع الى ضعف ارتفاع مجرى العضو الدائر.

(١١ – ٥) ممانعة التسرب المرحلية لكل من العضو الثابت والدائر:

(Stator and rotor leakage reactances)

توجد ثلاثة أنواع من الخطوط المغناطيسية المتسربة حول الملفات في كل من العضوين . هذه الأنواع الثلاثة هي:

أ) الخطوط المتسربة حول الموصلات عبر المجارى على مدى طول المنتج، وهى التى تكون الفيض المغناطيسى المتسرب حول المجاري (slot leakage) ϕ_s وعلى نحو ما فعلنا فى آلات التيار المتزامن (كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية) ، فاننا نبدأ بحساب قيمة السماح المغناطيسى λ_s لمسار الفيض المتسرب حول المجرى ، على حسب أبعاده ، وذلك لكل سنتيمتر واحد من طول المنتج . ويتم حساب ممانعة التسرب على أساس قيمة λ_s. ويكون حساب قيمة λ_s باستخدام قانون الدائرة المغناطيسية ، كما فعلنا فى آلات التيار

المستمر (كتاب هندسة الآلات الكهربية). وسوف نكتفى هنا بذكر قيم λ_s، الخاصة ببعض الأشكال شائعة الاستعمال من المجارى فى كل من العضوين الثابت والدائر، حيث نرمز بالرمز λ_{s1} للسماح المغناطيسي فى مجارى العضو العضو الثابت و λ_{s2} لتظيره بالنسبه للعضو الدائر.

يبين شكل (٤ ـ ٥) بعض أنواع المجارى المستخدمه فى العضو الثابت، وفيما يلى قيم λ_{s1} الخاصة ببعضها.

$$\lambda_{s1} = c_1 \frac{h_1}{3\,a} + c_2 \frac{h_2}{a}$$ [شكل (٤ — ٥) أ]

$$\lambda_{s2} = c_1 \frac{s}{3\,a} + c_2 \frac{h_2}{a} + \frac{d}{4\,a}$$ [شكل (٤ — ٥) ب]

...(٥ — ٢٥)

c_1 ، c_2 ثابتان يتوقف كل منهما على نسبة اتساع الملف τ_c إلى إتساع الخطوة القطر τ_p ، كما في شكل (٦ ـ ٥). المعادلة (٢٥ ـ ٥) خاصة بالمجارى المفتوحة التى تحتوى على طبقة واحدة والتى تحتوى على طبقتين من الملفات، وفيما يلى المعادلة المناظرة الخاصة بالمجارى نصف المقفلة.

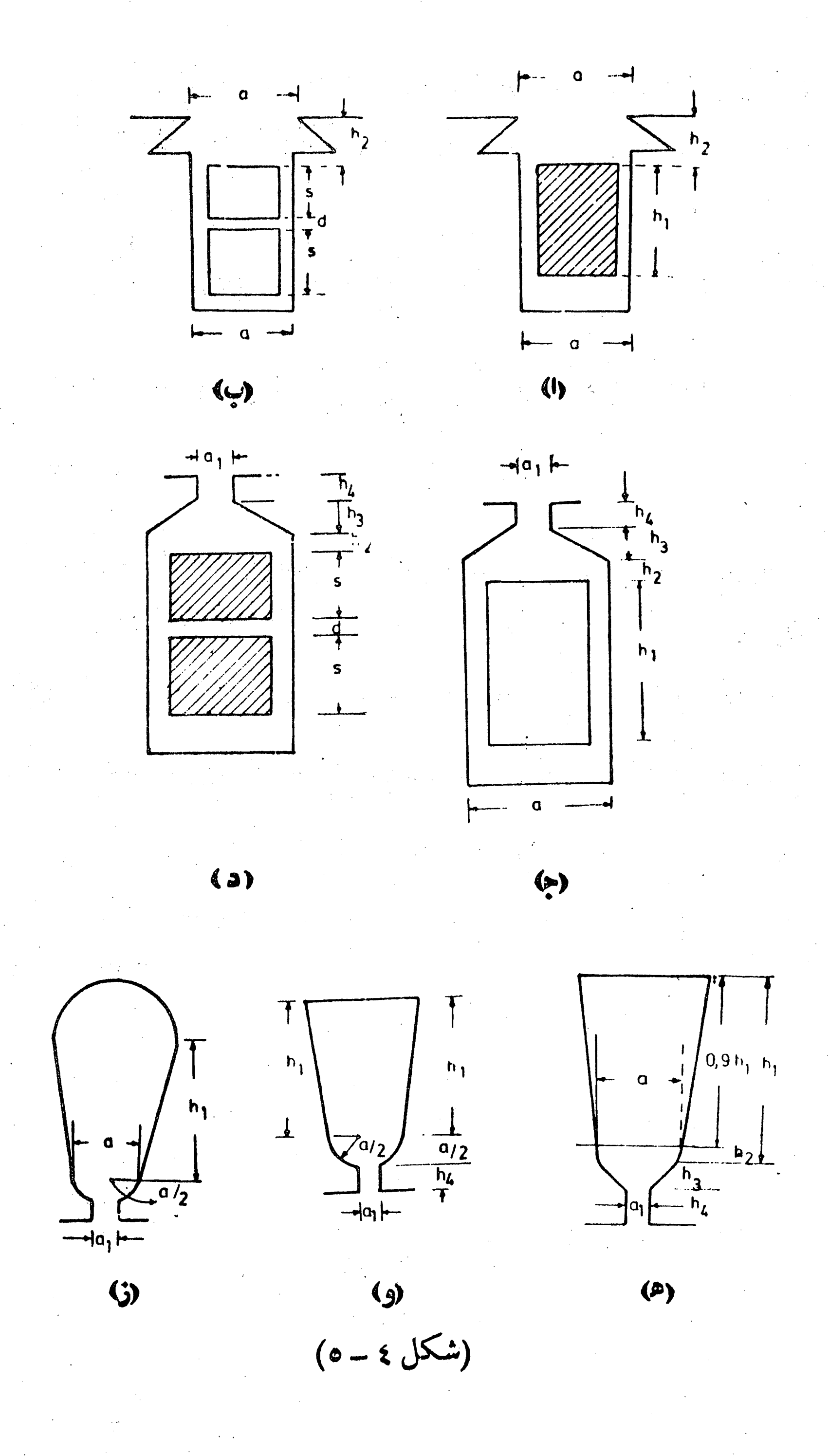
$$\lambda_{s1} = c_1 \frac{h_1}{3\,a} + c_2 \left(\frac{h_2}{a} + \frac{2h_3}{a+a_1} + \frac{h4}{a_1} \right)$$

[(شكل ٤ ـ ٥) حـ]

$$\lambda_{s1} = c_1 \frac{s}{3\,a} + c_2 \left(\frac{h_2}{a} + \frac{2\,h_3}{a+a_1} + \frac{h_4}{a_1} \right) + \frac{d}{4\,a}$$

[شكل (٤ ـ ٥) د]

... (٥ - ٢٦)



a
h2
s
d
s
a
h1
a
(ب)
(ا)
a1
h4
h3
s
d
s
h2
h1
a
(د)
(ج)
h1
a
a/2
a1
h1
a/2
a/2
h4
a1
0,9 h1
h1
a
b2
h3
a1
h4
(ز)
(و)
(ه)

(شکل ٤ ـ ٥)

توجد فى المحركات الصغيرة أشكال للمجارى تختلف عن الأشكال التقليدية السابقة ، وهى مبينة فى الأشكال (٤ — ٥) هـ ، و ، ز والمعادلات الخاصة بها كما يأتى :

$$\lambda_{s1} = \left(\frac{h_1}{3a} + \frac{2h_2}{a+a_1} + \frac{h_4}{a_1}\right) \qquad \text{[شكل (٤ — ٥) هـ]}$$

$$\lambda_{s1} = \left(0.65 + \frac{h_1}{3a} + \frac{h_4}{a_1}\right) \qquad \text{[شكل (٤ —٥)و ، ز]}$$

(٢٧ — ٥)

هذا وعند استخدام ملفات يدوية من طبقتين فى هذه المجارى ، تعدل القيم التى نحصل عليها من المعادلة (٢٧ — ٥) بمعامل مقداره ٨٧ ر٠ ، عندما تكون خطوة الملف τ_c إلى الخطوة القطبية τ_p تساوى $\frac{٥}{٦}$ ، وبمعامل مقداره ٨٤ر٠ عندما تكون النسبة $\frac{٧}{٩}$ ، وبمعامل مقداره ٦ر٠ عندما تكون النسبة $\frac{١}{٢}$

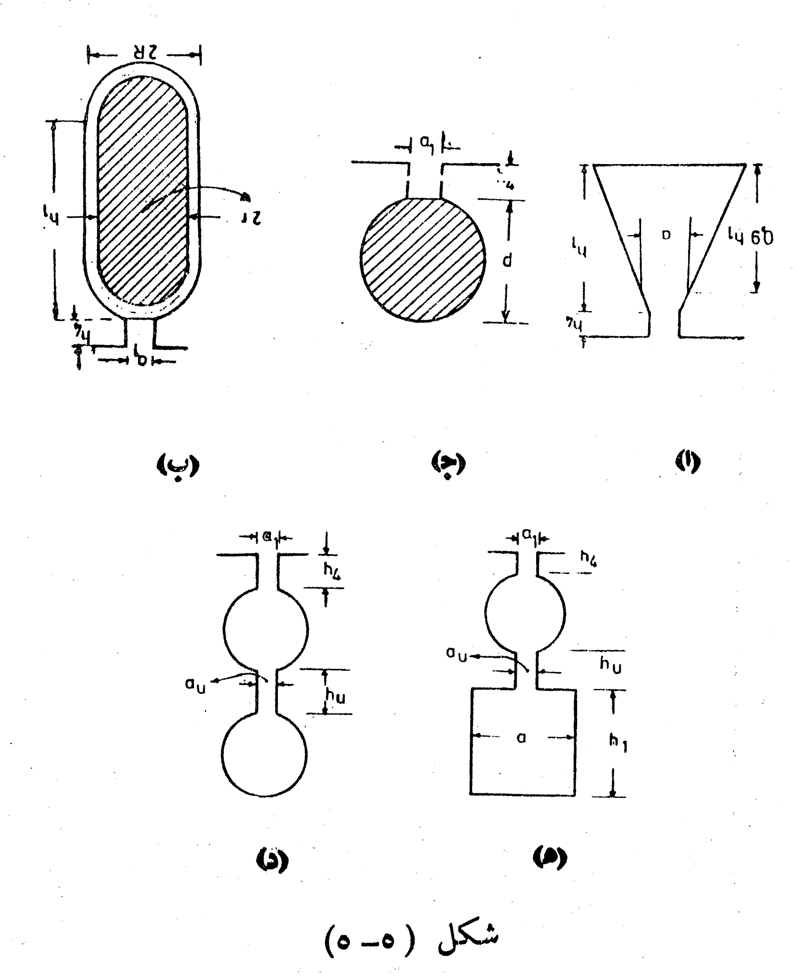
يبين شكل (٥ — ٥) بعض أنواع المجارى المستخدمة فى العضو الدائر (الملفوف وذى القفص السنجابى الواحد وذى القفصين)، وفيما يلى قيم λ_{s2} الخاصة ببعضها.

$$\lambda_{s2} = c_c \frac{h_1}{3a} + \frac{h_4}{a_1}$$ [شکل (٥ – ٥)]

$$\lambda_{s2} = 0.6 + c_c \frac{h_1}{6R} + \frac{h_4}{a_1}$$ [شکل ٥ – ٥) ب]

$$\lambda_{s2} = 0.65 + \frac{h_4}{a_1}$$ [شکل (٥ – ٥) ج]

(٥ -- ۲۸)

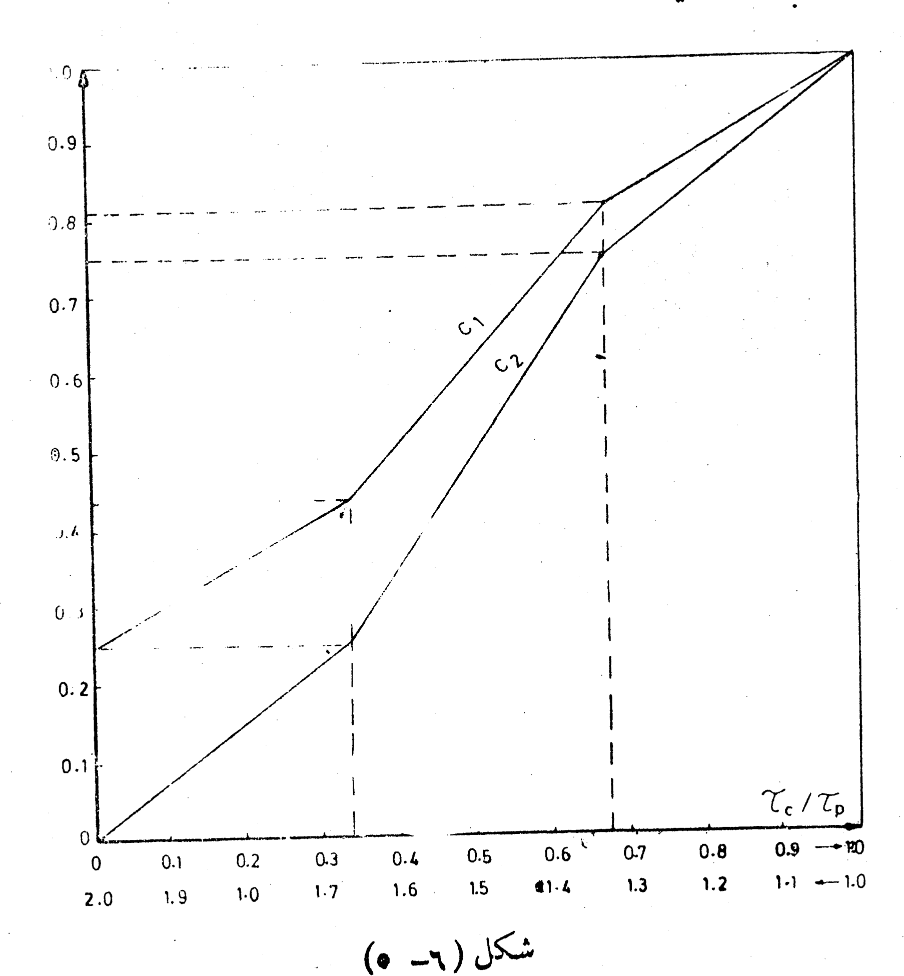


شکل (٥– ٥)

c_c معامل تتوقف قيمته على العمق المعدل h_i من عمق الموصل h_c بالعلاقة الآتية.

$$h_i \simeq \sqrt{s \frac{f}{50} \frac{1}{50\,\rho}}\, h_c \qquad (٢٩ - ٥)$$

وتؤخذ قيمة C_c من المنحنى شكل (٧ - ٥) ، مع ملاحظة أن s هو معامل الانزلاق ، f تردد الينبوع ، ρ هى المقاومة النوعية عند درجة حرارة التشغيل ، وقيمتها حوالي $\frac{1}{50}$ أوم ملليمتر مربع لكل متر . بذلك تكون قيمة h_i تساوى h_c فى حالةالسكون (1 ...) وعندما يكون ترددالينبوع ٥٠ ذبذبة فى الثانية.



شكل (٦- ٥)

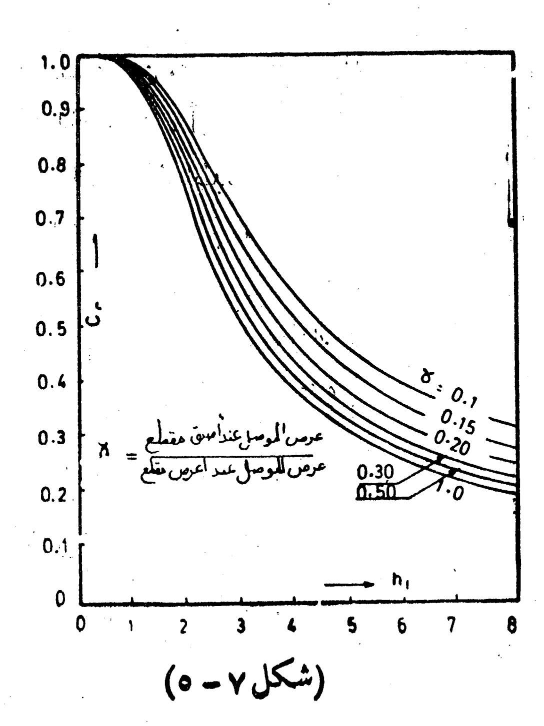
إذا رمزنا للجزء من ممانعة التسرب المرجلية الناشيء عن الفيض المتسرب حول مجارى العضو الثابت بالرمز X_{s1} ، و نظيره الخاص بمجارى العضو الدائر ، منسوبا لملفات العضو الثابت ، بالرمز X_{s2} ، نجد أن :

$$X_{s1} = 3.975 \times \left(\frac{Z_1}{3}\right)^2 \times f_1 \times \frac{l_a}{p} \times \frac{\lambda_{s1}}{q_1} \text{ ohm} \ldots \quad (٥ - ٣٠)$$

$$X_{s2} = 3.975 \left(\frac{Z_2}{3}\right)^2 \times f_1 \times \frac{l_a}{p} \times \frac{\lambda_{s2}}{q_2} \text{ ohm} \ldots \quad (٥ - ٣١)$$

$$X'_{s2} = 3.975 \left(\frac{Z_1}{3}\right)^2 \times f_1 \times \frac{l_a}{p} \times \frac{\lambda_{s2}}{q_2} \times \left(\frac{k_{w1}}{k_{w2}}\right)^2 \quad (٥ - ٣٢)$$

حيث Z_1 هو عدد الموصلات الكلى على العضو الثابت.



(شكل ٧ – ٥)

ونلاحظ أننا في حالة العضو الدائر ذى القفص السنجابى نعوض بالقيم $k_{w2} = 1$ ، $q_2 = \frac{S_2}{6p}$ ويكون طول المنتج l_a بالسنتيمترات و f_1 هو تردد الينبوع كالمعتاد.

(ب) الخطوط المتسربة حول رءوس الملفات (التوصيلات الطرفية) فى العضوين الثابت والدائر ، وهى التى يتم على أساسها حساب جزء ممانعة التسرب الخاص بهذه الأجزاء من الملفات . ويكون تحديد هذه الخطوط وحصر مسارها من الصعوبة بمكان ، مما يجعلنا نلجأ إلى استخدام علاقة عملية مقربة فى هذه الحالة تجمع ما بين العضوين معاً . فاذا رمزنا إلى جزء ممانعة التسرب الخاص برءوس الملفات فى العضوين معاً بالرمز X_h ، نجد أن:

$$X_h = 3.975 \times \left(\frac{Z_1}{3}\right)^2 \times f_1 \times \frac{l_{h1}}{p} \times \lambda_{h1} \times 10^{-8}$$

(٣٣ ـ ٥)

حيث l_{h1} هو الفرق بين متوسط طول الموصل l_c المعطى بالمعادلات (٢٢ ـ ٥) وطول المنتج l_a ، أى طول الجزء من الموصل الخاص بالتوصيلة الطرفية ، λ_s هو السماح المغناطيسى لكل وحدة طول من التوصيلات الطرفية ، مقدراً بالنسبة للعضوين معاً ، ويؤخذ من الجدول الآتى :

نوع ملفات العضو الدائر	ملفات العضو الثابت طبقة واحدة	ملفات العضو الثابت طبقتين
ملفوف ذو طبقة واحدة	٠ر٥	٠ر٣ – ٠ر٤
ملفوف ذو طبقتين	٠ر٤	٠ر٣
قفص سنجابى	٠ر٣٥	٠ر١٥ – ٠ر٢٥

هذا وتزداد قيمة X_h كلما قل عدد أقطاب المحرك ، حتي انها قد تشكل نصف قيمة ممانعة التسرب الكلية فى المحركات ذات القطبين .

ج) خطوط التسرب المتعرجـــة (zigzag leakage) ، وهى الخطوط المتسربة حول الموصلات في منطقة حديد المنتج، ولكنها تأخذ مساراً متعرجاً في الحديد ما بين أسنان العضو الثابت وأسنان العضو الدائر مارة فى الثغرة الهوائية عدة مرات . لذلك يمكن اهمال ممانعة التسرب الناشئة عن هذه الخطوط عندما يكون طول الثغرة الهوائية طويلا نسبياً. والحقيقة أن حساب هذه الممانعة من أشق الأمور ، لأنها تتوقف على عوامل كثيرة من الصعب تحديدها. ويمكن حساب السماح المغناطيسى لكل وحدة طول على نحو مماثل للنوعين السابقين بالنسبة للعضو الثابت λ_{z1} ، وبالنسبة للعضو الدائر λ_{z2} كما يأتى.

$$\left.\begin{aligned} \lambda_{z1} &= \frac{(\tau_{s2} - a_{1r} - a_{1s})^2}{12\ l_g\ \tau_{s2}} \\ \lambda_{z2} &= \frac{(\tau_{s1} - a_{1s} - a_{1r})^2}{12\ l_g\ \tau_{s1}} \end{aligned}\right| \quad (٥ - ٣٤)$$

حيث a_{1s} عرض فتحة المجرى في العضو الثابت و a_{1r} عرض فتحة المجرى فى العضو الدائر.

ويكون حساب ممانعة التسرب الخاصة بخطوط التسرب المتعرجة في العضو الثابت X_{z1}، وفى العضو الدائر (منسوبة الى ملفات العضو الثابت) X'_{z2} ، على نحو مماثل لما سبق كما يأتى:

$$X_{z1} = 3.975 \times \left(\frac{Z_1}{3}\right)^2 \times f_1 \times \frac{l_a}{p} \times \frac{\lambda_{z1}}{q_1} \times 10^{-8}$$

(٥ - ٣٥)

$$X_{z2} = 3.975 \times \left(\frac{Z_2}{3}\right)^2 \times f_1 \times \frac{l_a}{p} \times \frac{\lambda_{z2}}{q_2} \times 10^{-8}$$

(٥ ـ ٣٦)

$$X'_{z2} = 3.975 \times \left(\frac{Z_1}{3}\right)^2 \times f_1 \times \frac{l_a}{p} \frac{\lambda_{z2}}{q_2} \times \left(\frac{k_{w1}}{k_{w2}}\right)^2$$

(٥ ـ ٣٧)

تحسب قيمة ممانعة التسرب المرحلية المكافئة X_{1eq} منسوبة الى ملفات العضو الثابت وهى تساوى $(X_1 + X'_{20})$ باستخدام العلاقات المعطاة سابقاً فى هذا البند ، حيث نجد أن.

$$X_{1eq} = X_1 + X'_{20} = X_s + X_h + X_z$$
$$= (X_{s1} + X_{z1}) + (X'_{s2} + X'_{z2}) + X_h$$

(٥ ـ ٣٨)

ولتجنب الوقوع فى أخطاء حسابية، دون أن ندرى ، يمكننا مراجعة بعض القيم التى نحصل عليها ، والتى تقع عادة فى الحدود التالية.

λ_{s1} تقع ما بين ١ الى ٤

λ_{s2} تقع ما بين ٨ر٠ الى ٤ فى الأحوال العادية وقد تصل الى ١٠ عند وجود ممرات تسرب زائدة .

λ_h تقع ما بين ١٥ر٠ إلى ٥ر٠

q_1 , q_2 تقع ما بين ٢ إلى ٥

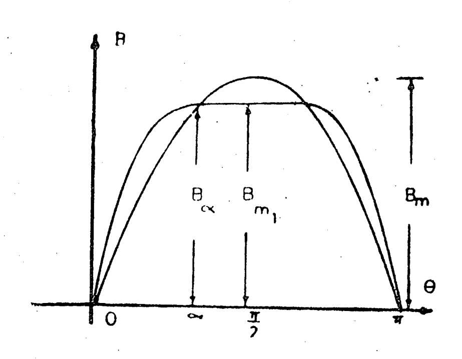
k_{w2} , k_{w1} تقع ما بين ٩ر إلى ٩٦ر٠ ($k_{w2} = 1$ فى حالة القفص السنجابى).

$\frac{I_{h1}}{I_a}$ تقع ما بين ٣ر الى ٥ر١

(١٢ ـ ٥) حساب تيار المغطسة المرحلي الداخل من الينبوع I_{ou} :

عند مرور تيارات متزنة ثلاثية المراحل (بينها اختلاف مرحلي زمني يناظر ١٢٠ درجة) ، يتكون مجال مغناطيسى دائر ، يدور بسرعة التزامن n_s (راجع رد فعل المنتج والمجال المغناطيسي الدائر صفحة ٩٨ كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية) . وقد ذكرنا فى الباب الأول أنه عند توصيل المحرك التأثيرى ثلاثى المراحل وهو غير محمل إلى الينبوع ، ينشأ مجال مغناطيسي دائر على هذا المنوال ، عدد خطوطه المغناطيسية ϕ_m خط لكل قطب . ويتوقف خواص تشغيل المحرك التأثيرى على وجود هذا المجال ، الذى نفترض عادة بقاء عدد خطوطه ϕ_m ثابتاً بفعل تيار المغطسة I_{ou} [شكل (٧ ـ ١) صفحة ٣٢] . والمسألة التى تواجهنا فى باب تصميم المحرك التأثيرى تتعلق بكيفية حساب قيمة I_{ou} ، بمعرفة ϕ_m وأبعاد المحرك التى تتوفر لدينا من حسابات التصميم . والحقيقة أن المسألة تصبح بهذا الشكل مسألة دائرة مغناطيسية ، يمكن حلها بنفس الطريقة التى اتبعت فى حالة كل من آلات التيار المستمر والآلات المتزامنة (راجع الدائرة المغناطيسية لآلة التيار المستمر والأمبير لفات اللازمة على كل قطب صفحة ٢٢٢ من كتاب هندسه الآلات الكهربية) . وإن خير ما نفعله في هذا المجال هو إعطاء مثال محلول يبين كيفية تطبيق النظريات المعروفة على هذه المسألة بالذات . ولكن قبل أن نفعل ذلك نحب أن نبين موضوعا خاصاً بالمحركات التأثيرية ، وهو يتناول العلاقة ما بين قيمة النهاية العظمى والقيمة المتوسطة لكثافة الخطوط المغناطيسية فى الثغرة الهوائية ، وهى تختلف عن العلاقة التى سبق الحصول عليها في حالة آلات التيار المستمر والآلات المتزامنة ، وذلك بسبب ظاهرة التشبع ، التى ينبغى أخذها فى الحسبان فى حالة المحركات التأثيرية بوجه خاص .

نحن نفـترض في معظم الأحوال ، كما فعلنا سابقاً ، أن منحنى كـثافة الخطوط المغناطيسية في الثغرة الهوائية هو منحنى جيبى ، قيمة النهاية العظمى له هى B_m جاوس ، كما فى شكل (٨ ـ ٥) . ولكننا نجد أن ظاهرة التشبع تؤدى إلي إعطاء قيمة أقل للنهاية العظمى لـكثافة الخطـوط المغناطيسية



شكل (٨ ـ ٥)

في الثغرة الهوائية ، فتصبح B_{m1} جاوس ، كما هو مبين فى شكل (٨ ـ ٥) فاذا افترضنا أن B_{m1} هذه هى قيمة كـثافة الخطوط على المنحنى الجيبى عند الزاوية ∝ ، كما هو موضح فى شكل (٨ ـ ٥) ، نجد أن

$$B_{m1} = B_{\propto} = B_m \cos \propto \qquad (٣٩ - ٥)$$

فاذا افترضنا أن ∝ تساوى ٣٠ درجة ، فان هذا يعنى أن

$$B_{m1} = 0.866 \quad B_m = 0.866 \times \frac{\pi}{2} \; B_a = 1.36 \; B_a$$

(٤٠ ـ ٥)

أى أن النسبة بين قيمة النهاية العظمى لـكثافة الخطوط المغناطيسية B_{m1} ، ومتوسط كـثافة الخطوط المغناطيسية B_a ، فى هذه الحـالة ، هو ١٫٣٦ بدلا من $\frac{\pi}{2}$. وفى الواقع أن اعتبار أن الزاوية ∝

تساوى ٣٠ درجة هو عملية تقديرية بحتة ، وفى بعض الأحيان تقدر قيمة $\propto$ بحيث تكون النسبة السابقة ١٫٤ ، وستكون حساباتنا القادمة فعلا على هذا الأساس.

يكون تقدير قيمة الأمبير لفات لكل قطب AT_p اللازمة لتمرير ϕ_m من الخطوط المغناطيسية لكل قطب ، فى الدائرة المغناطيسية للمحرك ، بنفس الطريقة التى اتبعناها فى آلات التيار المستمر والآلات المتزامنة ، وذلك على أساس الأبعاد التى حصلنا عليها من حسابات التصميم . وترتبط قيمة هذه الأمبير لفات بقيمة تيار المغطسة بالعلاقة الخاصة برد فعل المنتج للملفات ثلاثية المراحل فى الآلات المتزامنة (المعادلة (٢ ـ ٣) كتاب نظريات وتصميم الآلات الكربية) ، على النحو التالى :

$$AT_p = 1.35 \frac{T_{ph}}{p} I_{ou} k_w \qquad (٥ - ٤١)$$

$$I_{ou} = \frac{p\ AT_p}{1.35} \times \frac{1}{T_{ph}\ k_w} \qquad (٥ - ٤٢)$$

ونظراً لأننا اعتبرنا قيمة النهاية العظمى لكثافة الخطوط B_{m1} هى القيمة عند الزاوية $\propto$ على المنحنى ، كما سبق بيانه ، فان قيمة الأمبير لفات التى نحصل عليها وبالتالى قيمة تيار المغطسة تكون كلها عند الزاوية $\propto$ على المنحنيات الجيبية المناظرة . وبالقياس على المعادلة (٤٢ ـ ٥) يعنى هذا أن :

$$(I_{ou})_{\propto} = \frac{p\ (AT_p)_{\propto}}{1.35} \times \frac{1}{T_{ph}\ k_w} = I_{ou} \cos \propto$$

$$\therefore\ I_{ou} = \frac{p\ (AT_p)_{\propto}}{1.35} \times \frac{1}{T_{ph}\ k_w \cos \propto} \qquad (٥ - ٤٣)$$

وباعتبار أن النسبة بين متوسط كثافة الخطوط المغناطيسية وقيمة

النهاية العظمى لها هى $\frac{١}{١٫٤}$ تكون قيمة cos ∝ بالرجوع الي المعادلة (٤٠ – ٥) هى :

$$\cos \propto = 1.4 \times \frac{2}{\pi} = 0.89$$

و بالتعويض فى المعادلة ٤٣ – ٥ ينتج أن

$$I_{ou} = p \frac{(AT_p)_{\propto}}{1.35} \times \frac{1}{0.89\ T_{ph}\ k_w} \qquad (٤٤ - ٥)$$

مثال محلول :

Determine the length of the armature core of a 3-phase, delta connected, 16 horsepower, 8-pole induction motor, which has to be operated from 500 V, 50 Hz supply, at 85.8 % efiiciency and 0.66 power factor. The armature diameter is 23.5 cms and has a total number of 72 slots, with 22 conductors per slot. Assume a mean value for the flux density in the air gap of 4130 Gauss and neglect stator impedanee drop.

Draw a diagram for the stator winding connections under 4 poles, assuming single layer winding with two plane end connections. Indicate the start point for each phase and the number of coil groups in each phase.

$$I_{ph} = \frac{16 \times 746}{3 \times 500 \times 0.858 \times 0.66} = 14.06 \text{ Amps}$$

$$I_L = \sqrt{3}\ I_{ph} = 24.35 \text{ Amps},$$

$$n_s = \frac{60 \times 50}{4} = 750 \text{ r.p.m.}$$

$$Z = 72 \times 22 = 1584 \;,\; T_{ph} = \frac{Z}{6} = 264$$

$$q = \frac{72}{3 \times 8}\, 3 \;,\; \propto = \frac{360 \times 4}{72} = 20^\circ \text{ elect.}$$

$$AC = \frac{I_{ph}\, Z}{\pi\, D} = \frac{14.06 \times 1584}{\pi \times 23.5} = 301 \text{ amp. cond,/cm.}$$

$$k_w = \frac{\sin \frac{q \propto}{2}}{q \sin \frac{\propto}{2}} = \frac{\sin 30}{3 \sin 10} = \frac{0.5}{3 \times 0.1735} = 0.96$$

$$E = 4.44\, \phi\, T_{ph}\; f\, k_w \times 10^{-8}$$

$$500 = 4.44\, \phi \times 264 \times 50 \times 0.96 \times 10^{-8}$$

$$\phi = 0.989 \times 10^{6} \text{ lines} \;,\; \tau_p = \frac{\pi \times 23.5}{8} = 9.23 \text{ cms}$$

$$\frac{K\,W}{n_s} = 0.183 \times B \times AC \times 10^{-11} \times \cos \phi \times \eta\, D^2 l$$

$$\frac{16 \times 0.746}{750} = 0.183 \times 4130 \times 301 \times 10^{-11}$$

$$\times\, 0.66 \times 0.858 \times (23.5)^2 \times l$$

$$\therefore\; l = 26 \text{ cms}$$

يتم حل الجزء الثانى بعد مراجعة الباب الأول عن ملفات المنتج فى آلات التيار المتردد ، كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية [على نمط شكل (١٧ - ١) ب]

مثال محلول ٢ :

Determine the main dimensions for a 3—phase, 1208 horsepower, 3000V , 50 Hz, 1500 r.p.m., delta connected induction motor. The specific electric loading is about 561 amp. -cond./cm, the mean specific magnetic loading 5400 Gauss and ratio stator core length to pole pitch 0.91. Assume an efficiency of 0.95, a winding factor of 0.924, a power factor of 0.89 and neglect voltage drops in stator impedance.

Find the value of the no load current per phase in the motor, if it has an effective air gad length of 0.24 cm and the no load power factor is 0.1. Assume that the ampere turns per pole in the machine are equal to 1 times the ampere turns necessary to produce the flux in the air gap.

$$I_L = \frac{1208 \times 746}{\sqrt{3} \times 3000 \times 0.95 \times 0.89} = 205 \text{ Amps}$$

$$I_{ph} = \frac{205}{\sqrt{3}} = 118.4 \text{ Amps} \; , \; p = \frac{60 \times 50}{1500} = 2 \; , \; 2p = 4$$

$$C_0 = 0.183 \times 5400 \times 561 \times 0.95 \times 0.89 \times 0.924 \times 10^{-11}$$

$$\frac{1208 \times 0.746}{1500} = C_0 D^2 l \quad , \quad l = 0.91 \; \frac{\pi \times D}{4} = 0.715 \; D$$

باختصار الحسابات السابقة نحصل على النتائج الآتية:

$$D = 58 \text{ cms} \; , \; l = 41.5 \text{ cms} \; , \; \tau_p = 45.6 \text{ cms}$$

$$\phi_m = Bl \, \tau_p = 5400 \times 41.5 \times 45.6 = 10.2 \times 10^6 \text{ lines}$$

$$E \overset{\backsim}{=} V = 4.44 \, f \, \phi_m \, T_{ph} \, k_w \times 10^{-8}$$

$$T_{ph} = \frac{3000}{4.44 \times 10.2 \times 10^6 \times 50 \times 0.924} = 144$$

نحصل على الأمبير لفات اللازمة لتمرير الفيض المغناطيسى فى الثغرة الهوائية AT_g ، ومن ثم الامبير لفات لكل قطب AT_p ، على النحو التالي :

$$AT_g = 0.8\ B_g\ l_{ge} = 0.8 \times (1.36 \times 5400) \times 0.24 = 1410$$

وذلك باعتبار أن قيمة النهاية العظمى لكثافة الخطوط فى الثغرة الهوائية ١٫٣٦ مرة متوسط كثافة الخطوط ، كما سبق شرحه.

$$AT_p = 1.5 \times 1410 = 2115$$

باستخدام العلاقة (٤٣ ـ ٥) ، ومراعاة اننا اعتبرنا ان $\cos \propto = 0.866$ نجد ان :

$$I_{ou} = \frac{2 \times 2115}{1.35 \times 144 \times 0.924 \times 0.866} = 27.2 \text{ Amps}$$

وهـذه هى القيمة المطلوبة لتيار المغطسة فى المحرك

$$\cos \phi_0 = 0.1 \quad , \quad \sin \phi_0 = \sqrt{1 - 0.01} = 0.996$$

$$I_0 = \frac{I_{ou}}{\sin \phi_0} = \frac{27.2}{0.996} = 27.3 \text{ Amps}$$

وهذه هى القيمة المطلوبة لتيار اللاحمل فى المحرك.

مثال محلول (٣) .

Estimate the magnetising current for a 3-phase, 490 V, 60 Hz., 1200 r.p.m., delta connected induction motor, which has a magnetic circuit with the following particulars. core length 12.4 cms (excluding ducts). The stator has 54 parallel sided slots

each 1.05 cm wide aud 3.4 cm deep. The rotor has 72 parallel sided slots each 0.5 cm wide and 3.1 cm deep. The stator bore diameter is 29 ems, the air gap length is 0.5 mm and Carter's coefficient is 1.25. The mean flux density in the air gap is 4700 Gauss and the iron factor is 0.9. Stator and rotor core depths are 4.8 cms each. Assume a magnetisation cnrve for the steel laminations of the motor as follows:

H (amp. turns/cm)	0	2	5	12	20	40	60
B (kilo Gauss)	0	8	11.5	14	15	16.2	17

Neglect stator voltage drops.

$$p = \frac{60 \times 60}{1200} = 3 \;,\quad 2p = 6 \;,\; \alpha = \frac{360 \times 3}{54} = 20$$

$$q = \frac{54}{6 \times 3} = 3 \quad , \quad k_w = \frac{\sin 30}{3 \sin 10} = 0{,}96$$

$$E \simeq V = 4.44\ \phi_m\ T_{ph}\ f\ k_w \times 10^{-8}$$

$$\phi_m = B\ \tau_p\ l = 4700 \times 12.4 \times \frac{\pi \times 29}{6} = 8.86 \times 10^5 \text{ lines}$$

$$T_{ph} = \frac{490 \times 10^3}{4.44 \times 60 \times 8.86 \times 0.96} = 216$$

١ ــ الأمبير لفات اللازمة لتمرير الفيض المغناطيسي ϕ_m فى الثغرة الهوائية

$$AT_g = 0.3\ B_g\ l_g\ k_g \quad , \quad \tau_p = \frac{\pi \times 29}{6} = 15.16 \text{ cms}$$

$$B_g = 1.36\ B = 1.36\ \frac{8.86 \times 10^5}{12.4 \times 15.16} = 6400 \text{ Gauss}$$

$$AT_g = 0.8 \times 6400 \times 0.05 \times 1.25 = 3200 \text{ amp-turns}$$

٢ ـ الأمبير لفات اللازمة لتمرير الفيض المغناطيسى ϕ_m فى سنة العضو الثابت AT_{st} : $\tau_s \frac{1}{3}$ هى خطوة المجرى على بعد ثلث عمق المجرى من أضيق مقطع للسنة و $b_{st} \frac{1}{3}$ هو عرض السنة عند هذا العمق .

$$\tau_s \tfrac{1}{3} = \frac{\pi\ (29 + \frac{2}{3} \times 3.4)}{54} = \frac{\pi \times 31.267}{54} = 1.82 \text{ cm}$$

$$b_{st} \tfrac{1}{3} = 1.82 - 1.05 = 0.77 \text{ cm}$$

$$B_{st} \tfrac{1}{3} = \frac{1.36 \times 8.86 \times 10^5}{0.77 \times 0.9 \times 12.4 \times 9} = 15570 \text{ Gauss}$$

(راجع كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية صفحة ٢٩٨)

نحصل من منحنى التمغطس المعطى على الأمبير لفات لكل سم $H_{st} \frac{1}{3}$ المناظرة لكثافة الفيض المغناطيسى $B_{st} \frac{1}{3}$

$$H_{st} \tfrac{1}{3} \simeq 26 \quad , \quad AT_{st} = 26 \times 3.4 = 88$$

٣ ـ الأمبير لفات اللازمة لتمرير الفيض المغناطيسى فى قلب العضو الثابت AT_{stc} .

$$B_{stc} = \frac{8.86 \times 10^5}{2 \times 4.8 \times 12.4 \times 0.9} = 8260 \text{ amp-turns}$$

$$H_{stc} = 2.25 \qquad \text{من المنحنى}$$

$$l_{stc} = \frac{\pi\ (29 + 6.8 + 4.8)}{6 \times 2} = 10.64 \text{ cms}$$

$$AT_{stc} = 2.25 \times 10.64 \simeq 24$$

٤ ـ الأمبير لفات اللازمة لتمرير الفيض المغناطيسي ϕ_m في سنة العضو الدائر AT_{rt} .

$$\tau_r \tfrac{1}{3} = \frac{\pi\ (28.9 \times \frac{4}{3} \times 3.1)}{72} = 1.08\ \text{cm}$$

$$b_{rt} \tfrac{1}{3} = 1.08 - 0.5 = 0.58\ \text{cm}$$

$$B_{rt} \tfrac{1}{3} = \frac{1.36 \times 8.86 \times 10^5}{12.4 \times 0.9 \times 9.58 \times 12} = 15520\ \text{Gauss}$$

$H_{rt} \tfrac{1}{3} = 25$ مأخوذة من المنحنى

$$AT_{rt} = 25 \times 3.1 = 77.5 \overset{\text{ى}}{=} 78$$

٥ ـ الأمبير لفات اللازمة لتمرير الفيض المغناطيسي ϕ_m في قلب العضو الدائر AT_{rc} :

$$B_{rc} = B_{stc} = 8260 \quad , \quad H_{rc} \overset{\text{ى}}{=} 2.2$$

$$l_{rc} = \frac{\pi\ (29 - 6.2 - 4.8)}{6 \times 2} = 4.72\ \text{cms}$$

$$AT_{rc} = 11$$

ويكون مجموع الأمبير لفات اللازمة لكل قطب هو:

$$AT_p = 320 + 88 + 24 + 78 + 11 = 521$$

باستخدام العلاقة (٤٣ ـ ٥)، ومراعاة أننا اعتبرنا أن $\cos \propto = 0.866$ نجد أن:

$$I_{ou} = \frac{521 \times 3}{216 \times 0.96 \times 0.866 \times 1.35} = 6.46\ \text{Amps.}$$

(١٣ – ٥) استخدام الحاسب الإلكترونى فى تصميم المحركات التأثيرية :

(Application of the digital computer in designing induction motors)

يتضح لنا مما سبق أن عملية تصميم المحرك التأثيرى يحكمها عدد كبير من العوامل المتغيرة ، المرتبطة بعلاقات معينة مع بعضها البعض ، وأن النتائج التى نحصل عليها فى النهاية تتوقف على ضبط هذه العلاقات ، وتحديد تلك العوامل، بأساليب مختلفة . وعندما يراد ترشيد (optimisation) أحد هذه العوامل ، مثل ثمن المواد الداخلة فى صناعة المحرك ، أو إحدى خواص تشغيل المحرك بصورة معينة ، فان حسابات التصميم بالطرق التقليدية تصبح شاقة ومعقدة ، مالم توضع بعض القيود ، التى تعتمد أحيانا علي الاعتبارات المكتسبة من خلال الممارسة العملية ، وبدون فرض عدد محدود من المواصفات . وبالرغم من ذلك كله فان الوصول إلى الحل المنشود يصبح مستحيلا فى كثير من الاحيان .

سوف نتناول فى هذا البند ، باختصار ، كيف تمت الإستعانة بالحاسب الإلكترونى(The digital computer) حديثا لتطويع عملية تصميم المحركات التأثيرية ، وترشيد بعض العوامل المؤثرة فيها بحيث تصبح أكثر دقة ويسرا . هذا وأحب أن ألفت الانتباه منذ البداية إلى أن الحاسب الالكترونى لم يأت بجديد بالنسبة لقوانين التصميم التقليدية والعلاقات التي تحكمها ، كل ما هنا لك أنه هيأ لنا الوسيلة السهلة السريعة لإنجاز الحسابات المعقدة ، التى كانت تعرض لنا فى كثير من الأحيان فى أثناء عملية التصميم ، والتى كان انجازها يحتاج إلي وقت طويل ، وقد تصبح معه متعذرة فى بعض الأحيان . كما أنه هيأ لنا الإستفادة من القوانين والعلاقات المتطورة فى علم الآلات الكهربية ، التى تظهر من حين لآخر فى النشرات العلمية ، فى عمليات تصميم المحركات التأثيرية (وغيرها من الآلات الكهربية) ، بعد امكان حل مسائلها الحسابية على الحاسب الالكترونى بدون عناء .

مجمل القول أن الحاسب الإلكترونى قد حطم لنا حاجز التعقيد الحسابى ، (arithmatic barrier) الذى كان يحول بيننا وبين الإستفادة من كثير من العلاقات والقوانين المتطورة فى علم الآلات الكهربية ، وغيرها من العلوم المساعدة فى مجال التصميم .

وقد أصبح المجال الآن مناسبا لكى تبرز حقيقة هامة بالنسبة لعلم التصميم ، لم نتعرض لها فيما سبق ، وهى أن مسائل التصميم تنقسم إلى فئتين رئيسيتين ، الفئة الأولى تنضوى تحت لواء التصميم التحليلى (Design analysis) ، وهذا هو الأسلوب الذى درجنا علي استخدامه في جميع مسائل التصميم التى تعرضنا لها في كل المجالات السابقة ، والفئة الثانية وهي الخاصة بما يسمى بالتصميم الاصطناعى أو التركيبى (Design synthesis) ، وهو مالم نتعرض له حتى الآن .

والتصميم التحليلى ، كما يتضح لنا من الممارسة السابقة ، يؤدى إلى الحصول على خواص تشغيل المحرك (أو الآلة عموما) باستخدام مجموعة من المتغيرات، التى تحكمها علاقات خاصة ، مع الإستعانة بمجموعة من الثوابت المحددة . أما التصميم الاصطناعى فهو فن الحصول على مجموعة معينة من الثوابت ، التى تجعل خواص تشغيل المحرك ، فى النهاية ، مطابقة لمواصفات خاصة موضوعة مبدئيا . وتصادفنا فى خلال انجاز كل من عمليتى التصميم التحليلى والتصميم الاصطناعى مجموعة من العمليات الحسابية المعقدة ، التى يمكن أن يساعد الحاسب الالكترونى في حلها مساعدة ايجابية وفعالة .

وقد بدأت الإستعانة بالحاسب الالكترونى أصلا فى التصميم التحليلى ، حيث كانت مهمة الحاسب الالكترونى تنحصر فى تسهيل الحسابات ، وجعلها أسرع وأدق. وبالنظر إلى أنواع الحاسبات الالكترونية الموجودة فى ذلك الوقت فقد كانت الإستعانة بها فى عملية التصميم الاصطناعى ممكنة بمؤازرة المجهود

الإنسانى ، وذلك بأن يقوم المصمم بتقدير مبدئى للثوابت المطلوبة (على هدى خبرته العملية المكتسبة فى هذا المجال) ، ويستخدمها فى تغذية المدخل للحاسب الالكترونى (Computer input) ، فيكون مخرج الحاسب الالكترونى (Computer output) هو عبارة عن خواص التشغيل التحليلية (أى التى نحصل عليها من خلال عملية تصميم تحليلي) للمحرك . ويمكن للمصمم بعد فحص هذه النتائج تعديل الثوابت المفروضة مبدئيا ، على هدى خبرته العملية المكتسبة ، والحصول على ثوابت أكثر قربا من الثوابت المطلوبة ، لتغذية الحاسب الالكترونى من جديد . ويتم تكرار هذه العملية حتى نحصل على خواص التشغيل المحددة مبدئيا .

وعلى هذا النحو أمكن استخدام البرنامج التحليلى (analysis program) فى الحاسب الالكترونى للحصول على مخرج نهائى من الحاسب على هيئة تصميم اصطناعى . وفى الحقيقة أن البرامج التحليلية مازالت تستخدم حتى الآن على نطاق واسع في حل مسائل تصميم الآلات الكهربية على الحاسب الالكترونى ، وذلك لأنها سريعة وسهلة الإعداد ، ويمكنها أن تعطى عائدا وفيرا من المعلومات فى مقابل انفاق صغير نسبيا .

حل مسائل التصميم الاصطناعى والترشيد فى المحركات التأثيرية على الحاسب الالكترونى

عند القيام بحل مسائل التصميم الاصطناعي فى المحركات التأثيرية (والمحركات عموما) نهتم بصفة خاصة بالمتغيرات المستقلة (independent variables) التي تتعلق بالابعاد ومواد التصنيع لكل من الدائرة الكهربية والدائرة المغناطيسية للمحرك ، وكذلك المتغيرات الخاصة بالمواد العازلة ومعدات التهوية . ويجب أن نفرق فى هذا المضار بين المعطيات المتغيرة الخاصه بالمدخل ، وهى التى تشمل البنود والمفردات التى يحددها الزبون

(طاب المحرك) فى مواصفاته ، مثل الضغط الخطى ، وتردد الينبوع ، ومعامل القدرة ومعامل الجودة عند الحمل الكامل ، وغير ذلك من المتطلبات ، وبين معطيات المخرج المتغيرة ، وهى التى تشتمل على قطر التجويف (bore diameter) وطوله ، وعدد المجارى وأبعادها ، وغير ذلك من الابعاد التى سوف تؤهل المحرك لإعطاء خواص التشغيل التى يرغب فيها الزبون .

فاذا راودنا التفكير ، عند هذا الحد ، فى محاولة الحصول على حلول منظومية (System solutions) للمسألة ، فسوف يقف حائلا بيننا وبين ذلك مشاكل اللاخطية (nonlinearities) وعدم الإستمرار (discontinuities) ، وكذلك الإعتبارات الإقتصادية المتضمنة . وهذا يؤكد مرة أخرى ضرورة تآزر المجهود الإنسانى الذى لا يمكن تجاهله بأية حال من الأحوال ، مع ترتيب أقصى استفادة ممكنة من الحاسب الالكترونى ، للحصول على النتائج المرجوة .

هذا ، ويكون حل مسألة التصميم الاصطناعى أكثر سهولة بالنسبة للمحركات التأثيرية الصغيرة ، التى تستخدم فيها الإطارات القياسية (Standard frames) . فاذا ما اصبحت ابعاد العضو الثابت قياسية ، يقل عدد المتغيرات المستقلة إلى حد كبير ، ويبقى منها أساسا اثنان ، وهما طول القلب (Core length) وعدد اللفات فى كل مرحلة . بذلك تؤول المسألة إلى نوع من الاصطناع الجزئى (partial synthesis) ، الذى يمكن معالجته على نحو ما أطلق عليه اسم التحقيق المتطور (progressive realization) ، حيث يتم تعديل المتغيرات المستقلة بدرجات مرسومة ومحددة فى كل مرة يعاد فيها التصميم ، حتى ينتهى الأمر بالحصول على حل مرض . ويمكن استخدام نفس الطريقة لترشيد تصميم المحرك . وعلى سبيل المثال فان ترشيد ثمن المواد يمكن أن يتم عن طريق عمل مسح شامل لجميع التصميمات المحتملة ، واختيار المناسب منها ، على نفس المنوال .

برامج الحاسب الالــكترونى (Computer programs)

لن نتعرض هنا لطرق عمل البرامج ولغتها ، فهذا موضوع خارج عن الـكتاب ، ولـكن قد يكون من اللازم أن نذكر فى هذا المجـال أن أداء عمليات التصميم على الحاسب الإلـكترونى يحتاج إلى تقليل عدد المتغيرات التى تدخل في عمليات التصميم بالطرق التقليدية ، وذلك بتحويلها إلى متغيرات جديدة ذات عدد أقل ، وترتبط بينها علاقات مناسبة . وتستخدم فى الوقت الحاضر تحويلات كـثيرة من هذا النوع . وإلى جانب ذلك يمكن أن نعدد البرامج الروتينية (program routines) المستخدمة على النحو التالى:

١ ـ البرنامج السلبى (passive program) : وهى مجموعـة الروتينات (routines) التى تطلق البيانات للبرنامج أو التى تقوم بعملية التصميم التحليلى، باستثناء الروتينيات التى تدخـــل تحت لواء برنامج التشغيل.

٢ ـ برنامج التشغيل (performance program) : وهى الروتينيات المتعلقة بحساب ثوابت الدائرة المكافئة ، ثم حساب خواص التشغيل بنـــاء على ذلك

٣ ـ البرنامج العامل(active program) : وهو الذى ينظم عمليةالبحث عن الحلول.

٤ ـ برنامج الدوالى (functions program) : ويشتمل على مجموعة من الدوالى الخاصة ببعض الحســابات المتعلقة بالتصميم ، مثل حسابات الممانعة ، والحسابات الخاصة بمنحنيــات التمغطس (magnetic B-H relations)، وما يصاحب ذلك من ظاهرة التشبع ، وكـذلك حسابات فتحات المجـــارى وأبعاد الملفات.

٥ - برنامج المدخل والمخرج : (Input and output program) وهو الذى يسجل المفردات الداخلة ، ويراجع على صحتها ، ثم ينقل عملية التحكم إلى روتين توجيهى (steering routine) . وكلما أعيد التحكم كرة أخرى تسجل بيانات جديدة . هذا ويسجل آخر روتين الوضع بالنسبة لجميع ثوابت المخرج عند نهاية دورة كاملة . وينظم روتين مخرج جميع روتينيات المخرج الفرعية المحدودة ، ويطبع المعلومات الخاصة بالتصميم والتشغيل.

٦ - البرنامج المراقب (monitor porgram) وهو يشتمل على مجموعتين من الأوامر : (أ) طبع المعلومات الخاصة بطريقة حساب تصميم معين لبيان كيفية الحصول على هذا التصميم ، وذلك لتسهيل اجراء عمليات التحسين و (ب) اصطياد الأخطاء

ويأخذ مثل هذا البرنامج زمناً يقدر بحوالى ٨٠ ثانية على الحاسب الالكترونى ، ويتكلف مبلغاً مقداره حوالى ٤٠ جنيها الكل حالة ، ولكنه يعطى عدة احتمالات للتصميم فى هذه الحالة.

الباب السادس

وسائل التحريك الكهربى

(Electric Dirves)

(٦ – ١) نبذة عن نشوء وتطور تكنولوجيا وسائل التحريك الكهربى :

عندما بدأ المحرك الكهربى (Electric motor) ،فى مطلع القرن العشرين، يأخذ مكان الآلة البخارية (steam engine) ،وخطوط نقل الحركة الميكانيكية (Transmission) ، أخذ ذلك يتم عن طريق استخدام المحرك الكهربى بدلا من الآلة البخارية، أو خط نقل الحركة الميكانيكية ، بحيث يمكن الاحتفاظ بجميع مقومات الإدارة الميكانيكية كما هى بدون تغيير . وقد كانت الآلة البخارية الواحدة تقوم بادارة عدد كبير من الآلات الميكانيكية فى المصنع الواحد ، باستخدام خطوط نقل ميكانيكية عديدة الفروع.

وقد تطور الأمر بعد ذلك إلى الاستغناء عن خطوط النقل الميكانيكية ، بين المحرك الرئيسي (Main Motor) والآلات الميكانيكية المتفرقة التي يديرها، واستخدام محرك كهربى خاص بكل آلة علي حدة ، يرتبط بها ارتباطاً مباشراً على عمود إدارتها (Direct coupling between machine and motor) هذا وقد تطور الأمر إلي أبعد من ذلك بالنسبة للآلات التي تحتاج إلى إدارة فى أجزائها المختلفة ، وليس على عمود إدراتها الرئيسى فقط . فبدلا من استخدام محرك كهربى واحد يقوم بادارة الأجزاء التى تحتاج إلى الحركة فى الآلة بأ كملها، عن طريق نقل الحركة إليها من هذا المحرك بالوسائل الميكانيكية المناسبة ، يستخدم محرك مستقل وقائم بذاته لإدارة كل جزء يحتاج إلى الحركة فى الآلة الواحدة نفسها.

وبذلك نجد أننا انتقلنا من مرحلة التحريك الكهربى المستقل مفرد المرحلة (individual single-motor drive)، حيث يقوم محرك كهربى واحد بتحريك جميع الأجزاء التى تقوم بعمليات رئيسية أو ثانوية فى الآلة الواحدة ، إلى مرحلة التحريك الكهربى المتعدد المستقل (individual multi-motor drive) . وفى هذه الحالة نجد محركا كهربياً قائماً بذاته لإدارة كل جزء يحتاج الى الحركة فى نفس الآلة . فاذا أخذنا المخرطة (lathe) فى الورشة مثالا لشرح ما سبق ، نجد أن مصدر الحركة فى الورشة بأ كملها كان فى بداية الأمر محركا ميكانيكا كبيراً ، تنقل منه الحركة بخطوط النقل الميكانيكية الى الآلات المختلفة فى الورشة ، ومنها مخرطتنا التى نضرب بها المثل ، ثم حل المحرك الكهربى الكبير محل المحرك الميكانيكى ، مع الاحتفاظ بكل وسائل نقل الحركة الميكانيكية كما هى . وتطور الأمر بعد ذلك ، فأصبح لكل آلة فى الورشة محركا قائماً بذاته ، حيث يقوم محرك خاص بالمخرطة بادارتها ، وكذلك توفير الحركة اللازمة لاجزائها المختلفة بوسائل النقل الميكانيكية (حركة القطعة المخروطة وادارة مكبسى التبريد والتزييت) . وأخيراً أصبحنا نجد عدة محركات كهربية خاصة بالمخرطة الواحدة ، كل محرك يقوم بادارة جزء منها ، مع وجود التكامل المناسب فى الحركة بينها .

ويميل التطور الى ناحية استخدام التحريك الكهربى المستقل المتعدد المراحل فى الصناعة ، وذلك لأنه يساعد على آلية العمليات الانتاجية (automation of production processes) . كما أن التحريك الكهربى ، فى حد ذاته ، أصبح لا يبارى ، نظراً لما يطرأ على وسائل التحكم فى المحرك الكهربى ، بالنسبة لسرعته وعزم دورانه وبدئه ، وايقاف وعكس حركته ، من تطور سريع ومستمر ، بطرق مضمونة ومتقنة ، تكاد تصل الى حد الكمال فيما جد من تطورات .

هذا وان امكانية استخدام الحاسبات الالكترونية لعمل برامج ، تقوم

بتنفيذها عناصر تحكم مخصوصة يمكن اضافتها الى دائرة التحكم في المحرك الكهربى ، سوف تساعد على وضع أسس التكامل الآلى بين خطوط الانتاج فى المصنع الواحد ، بل وبين المصانع المختلفة، أو حتى المشروعات المتعددة.

وقد يثور الاعتراض بأن الاتجاه الى تفتيت التحريك على هذا النحو ، واستخدام محركات كهربية صغيرة يكون معامل جودتها منخفضاً نسبياً ، بدلا من تركيز التحريك الرئيسي فى محرك كبير يكون معامل جودته عالياً وثمنه أرخص كثيراً من مجموعة المحركات البديلة ، بحكم القواعد الثابتة للتصميم ، قد يكون ذلك خطأ من الناحية الاقتصادية ، حيث يؤدى الى زيادة فى التكاليف. وهذا جريا على ما ألفناه بالنسبة لمحطات التوليد الكهربية، حيث يؤدى تركيز توليد القدرة الكهربية بكميات هائلة ، ثم نقلها وتوزيعها عند أماكن استخدامها ، الى خفض واضح فى تكاليف انتاجها.

ويبدو الإعتراض وجيها لأول وهلة ، ولكن اعتبارات كثيرة خاصة بموضوع التحريك الكهربى ، تثبت عكس ذلك على خط مستقيم. من هذه الاعتبارات ، على سبيل المثال وليس على سبيل الحصر ، أن كل آلة عاملة يراد ادارتها نستلزم شروطا مناسبة فى الآلة المحركة ، لكى يكون تشغيلها مثمراً من الناحية الاقتصادية. ولا يمكن بطبيعة الحال توفير آلة واحدة محركة، لعدد من الآلات العاملة، يمكن أن تستوفى جميع الشروط اللازمة لتشغيل كل هذه الآلات تشغيلا اقتصاديا ناجحاً . ومن الواضح أن سهولة المواءمة بين الآلة العاملة ومحركها الخاص بها ، لإعطاء أحسن تشغيل اقتصادى لها ، يمكن أن يؤدى إلى بعض التعويض في التكاليف الزائدة الناشئة عن انخفاض معاملات الجودة لمجموعة المحركات الصغيرة، التى تستخدم كبديل لمحرك رئيسي كبير ذى معامل جودة مرتفع نسبيا . كما أن احتمال تشغيل المحركات الكهربية المستقلة ، كل على حدة ، فى حدود الحمل الكامل

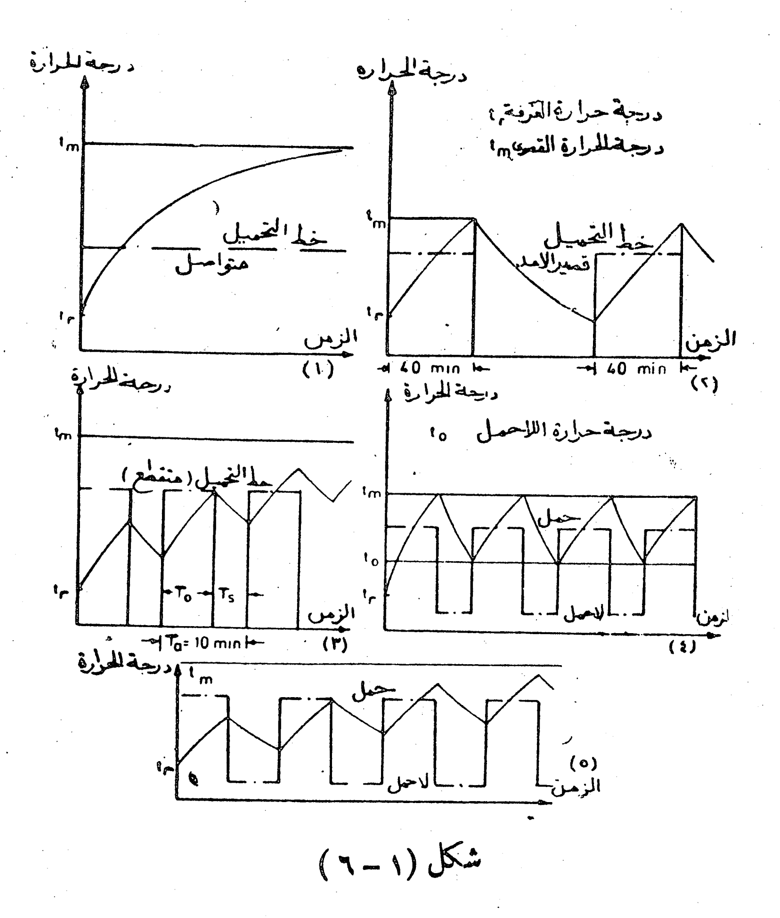
فى أغلب الأحيان ، يفوق كثيراً احتمال تشغيل المحرك الكهربى الرئيسى الواحد بنفس الشروط ، مما يجعل المحركات المستقلة أكثر اقتصاد عموما فى تكاليف التشغيل .

(٢ ـ ٦) الأنواع القياسية للتحريك الكهربى:

(Standard types of electric drives)

لم يوجد حتى الآن أى نوع من المحركات ينافس المحرك الكهربى فى دقة ملاءمته للمتطلبات الخاصة بحسن تنفيذ العمليات الصناعية المتباينة . فالمحرك الكهربى يمكن تصميمه وتنفيذه ، على أحسن وجه من الناحيتين الاقتصادية والتكنولوجية ، بقدرات تتراوح ما بين جزء صغير من الوات (المحركات التى تستخدم فى لعب الأطفال ودوائر التنظيم الالكترونية) إلى عشرات الآلاف من الكيلووات (المحركات التى تستخدم فى درفلة الحديد) ، كما أن سرعة الدوران يمكن أن تقع بين خمسين لفة وعشرين الف لفة فى الدقيقة ، ويمكن ان تصل إلى خمسين الف لفة فى الدقيقة مع امكانية دقة تنظيم هذه السرعات فى حدود متفاوتة . هذا الى جانب سهولة عمليات بدء وايقاف المحرك ، وعكس اتجاه دورانه ، بما قد يصل إلى حوالى سبعة آلاف مرة فى الساعة.

وتكمن اهم العوامل التى تميز المحرك الكهربى ، على غيره من المحركات، فى إمكان تنفيذ تصميمه من البداية على اساس خطة زمنية مناسبة للآلة العاملة ، التى سوف يقوم بادارتها . وتتوقف هذه الخطة على مقدار الوقت الذى تقوم فيه الآلة العاملة بالشغل المطلوب ، وكذلك مقدار الوقت الذى تكون فيه عاطلة عن العمل ، او تدور فيه بدون حمل . وعلى هذا الأساس فان القواعد التى تختص بتقييم واختبار الآلات الكهربية تشير الى تقسيم المحركات الكهربية ، من حيث خطة التشغيل الزمنى لها ، الى ما يأتى (انظر شكل ١ ـ ٦) :



شكل (١ ـ ٦)

١ ـ التشغيل المتواصل (Continuous rating) : تحتاج الآلة العاملة ، لأداء وظيفتها فى هذه الحالة ، إلى تشغيل المحرك بصورة مستمرة ، وبالحمل الكامل غالباً ، بحيث تصل درجة الحرارة ، فى أجزائه المختلفة ، إلى قيمتها القصوى ، التى تم تنفيذ التصميم على أساسها ، ولا تتعـــداها مع استمرار التشغيل لأية فترة بعد ذلك . وتعمل مثل هذه المحركات مع المضخات التى يستمر عملها ليلا ونهاراً ، وما أشبه من الأعمال.

٢ ـ التشغيل قصير الأمد (Short period rating) : تحتـاج الآلة العاملة ، فى هذه الحالة ، إلى فترات تشغيل متفرقة ، تمتد كل منها على فترة

زمنية محددة ، بحيث لا يؤدى تشغيل المحرك فى خلال هذه الفترة الى تعدى درجة الحرارة القصوى فى أى جزء من أجزائه . كما أن فترة الراحة ، التى تفصل بين كل فترتى تشغيل ، تكفى لـكى يبرد المحرك ويأخذ درجة حرارة الجو المحيط به . ويطلق على حمل المحرك ، الذى يعطيه فى خلال فترة التشغيل، اسم الحمل الأمدى (period loading) ، وهو يقرن عادة بمدى فترة التشغيل ، فيقال مثلا محرك (١٥ كيلووات — ٤٠ دقيقة)(10 KW — 40 min motor)

٣ — التشغيل المتقطع (Intermittent rating) : يكون تشغيل المحرك فى هذه الحالة لفترات قصيرة تتخللها فترات من الراحة يوقف فيها المحرك تماما . ولكن فترات الراحة ، بخلاف الحالة السابقة ، لا تكفى لـكى تنخفض درجة حرارة المحرك إلي حد درجة حرارة الجو المحيط به ، ولكنها تنخفض بعض الشيء لـكى تعاود الارتفاع فى فـترة التشغيل التالية الى درجة أعلى منها فى فترة التشغيل السابقة ، وهكذا ، دون أن تتعدى الدرجة القصوى على أى حال . وتحدد فترة التشغيل (operation period) T_0 بالدقيقة مثلا ، كما تحدد فترة الراحة أو السكون (still stand period) T_s بالدقيقـــة ، بحيث لا يتعدى أمـــد الدورة T_a (تشغيل وايقاف $T_a = T_0 + T_s$ min) عشر دقائق بأية حال من الأحوال . ويطلق على النسبة بين زمن فترة التشغيل وأمد الدورة $\frac{T_0}{T_a}$ اسم فترة التوصيل النسبية (relative switching period) ، كما يطلق اسم الحمل المقنن أو الحمل الأمدى (rated load or period load) على الحمل الذى يمكن تشغيل المحرك به على النحو سالف الذكـر ، لأية فترة مهما بلغت من الطول ، دون ان يتعدى المحرك درجة حرارته القصوى .

٤ — التشغيل المتواصل بفترات تحميل قصيرة الأمد (Continuous rating with short period loading) يختلف هذا النوع من التشغيل ، عن التشغيل قصير الأمد ، من حيث ان المحرك بعد فترة تحميل قصيرة الأمد ،

يترك دائراً بدون حمل، مدة كافية ، بحيث تهبط درجة حرارته الى الحد الذى تقف عنده فى حالة دورانه بصفة مستمرة بدون حمل .

٥ ـ التشغيل المتواصل بفترات تحميل متقطعة (Continuous rating with intermittent loading) يختلف هذا النوع من التشغيل ، عن التشغيل المتقطع، من حيث ان المحرك يمر بفترات متعاقبة، من التشغيل بالحمل الكامل ، والدوران بدون حمل بدلا من السكون . وتكون فترة التوصيل النسبية ، فى هذه الحالة ، هى النسبة بين زمن التشغيل بدون حمل ، وامد الدورة الذى يجمع بين زمنى فترتى التشغيل بالحمل وبدون حمل .

هذا ويجب على المحرك الكهربى أن يفى بغرضين رئيسيين ، مهما اختلف نوع تشغيله ، على النحو السابق ، وهما :

١ ـ ألا تتعدى درجة حرارته، فى أثناء التشغيل ، بأية حال من الأحوال، درجة الحرارة القصوى ، تبعاً للحدود القياسية (Standard limits) التى تم تنفيذ تصميمه على اساسها .

٢ ـ يجب ان يكون المحرك الكهربى قادراً على اعطاء الآلة العاملة عزم الدوران الذى تحتاج اليه عند سرعة الدوران المطلوبة .

وتجدر بنا الاشارة ، فى هذا المضمار ، الى ان المحرك الكهربى يستطيع ان يعطى عزم دوران يصل الى قيمة عزم دوران التعثر (Kipp - moment) ، التى تقضى القواعد القياسية المنظمة لطرق تنفيذ تصميم المحركات الكهربية بأن تبلغ ١ر٦ من قيمة عزم دوران الحمل الكامل بالنسبة للمحركات ذات التشغيل المتقطع .

لهذا السبب نجد ان المحرك الكهربى يمكن فى خلال تشغيله تشغيلا متواصلا ان يتعدى درجة الحرارة القصوى التى تم تنفيذ تصميمه على اساسها ، دون ان يتعدى عزم دورانه عزم دوران التعثر ، وذلك عند تجاوز الحمل الكامل ، الذى يتميز

به . وهذا يعنى ان الفيصل فى وضع حدود التشغيل يكون عادة درجـــة الحرارة القصوى ، التى لا يجب ان يتعداها المحرك ، قبل الزيادة المحتملة فى قيمة عزم الدوران ، الذى يمكن ان تحتاج اليه الآلة العاملة.

هذا وعندما يكون تصميم المحرك الـكهربى على اساس التشغيل المتواصل بقدرة معينة ، ولنفرض انها س كيلووات مثلا ، فان هذا المحرك يبلغ درجة حرارته القصوى ، ويظل محتفظاً بها ، مهما طال وقت تشغيله . فاذا حدث وتم تشغيل هذا المحرك بنفس قيمة الحمل س كيلووات ، تشغيلا قصير الأمد ، او تشغيلا متقطعاً مثلا ، فمن الواضح انه لن يبلغ درجة حرارته القصوى ويظل محتفظاً بها ، مهما طال وقت تشغيله . فاذا حدث وتم تشغيل هـــذا المحرك ، بنفس قيمة الحمل س كيلووات تشغيلا قصير الأمد ، أو تشغيلا متقطعاً مثلا ، فمن الواضح أنه لن يبلغ درجة حرارته القصوى على المدى الطويل ، وذلك بسبب فترات الراحة التى تنخفض درجة حرارته فى خلالها. وهذا يعنى أننا نستطيع تشغيله على أى من النحوين بزيادة عن الحمل الكامل . وفي هذه الحالة يجب أن نراعى ألا يتعدى عزم الدوران الذى يؤخـذ من المحرك عزم دوران التعثر ، أى أن الفيصل فى وضع حد لزيادة الحمل التى يمكن أن نتجاوز بها الحمل الكامل ، فى هذه الحالة ، هو عزم دوران التعثر للمحرك ، وليست درجة الحرارة القصوى كما كان الأمر فى الحالة السابقة.

(٣ ـ ٦) التوازن الديناميكى بين المحرك الـكهربى والآلة العـاملة :

(Dynamic Balance between driving electric-motor and working machine)

يعطى المحرك الكهربى ، على حسب الظروف الكائنة فى دائرته الكهربية المتصلة مع الينبوع الـكهربى ، عزم دوران معين ، عند سرعة الدوران التى تفرضها الآلة العاملة على عمود الادارة المشترك بين المحرك والآلة ، تبعاً لمقدار الحمل على الآلة . بذلك تتحدد نقطة التشغيل على المنحنى الخصائصى للمحرك

(characteristic curve)، الذى يربط عزم دوران المحرك مع السرعة . ويحدث توازن ديناميكى بين عزم الدوران الذى يبذله المحرك ، على هذا الأساس على عمود الإدارة المشترك ، مع رد فعل الآلة العاملة ، الذى يتكون فى هذه الحالة من محصلة ثلاث مركبات لعزم الدوران المضاد ، وهى : ١ ــ عزم دوران التعجيل أو التقصير (accelerating or retarding torque) الناشىء عن عزم القصور الذاتى للكتل الدائرة (moment of inertia of rotating masses)، وذلك عندما تكون سرعة الدوران متغيرة ، وتتلاشى هذه المركبة لعزم الدوران المضاد المحصل عندما يدور المحرك بسرعة ثابتة .

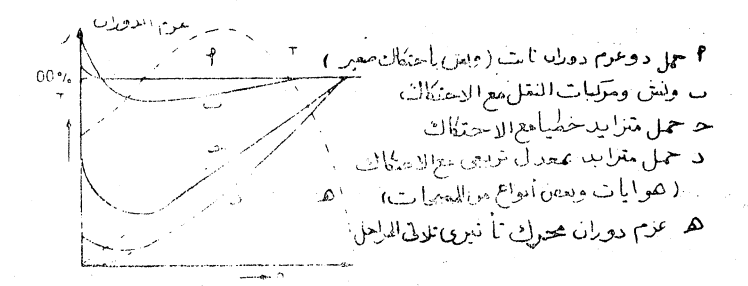
٢ ــ عزم الدوران النافع (useful torque) وهو الذى يستفاد به لآداء الشغل المطلوب من الآلة العاملة .

٣ ــ عزم دوران المفقودات الميكانيكية (Mechanical loss torque) وهو الذى يتغلب على مقاومة الهواء لحركة الدوران، والاحتكاك الناشىء فى الكراسى وغيرها من الأجزاء المختلفة فى المحرك والآلة العاملة .

وعندما يتغير الحمل على الآلة العاملة ، بالزياده أو النقصان ، يختل التوازن الديناميكى بين عزم الدوران المحرك وعزم الدوران المضاد ، مما يؤدى إما إلى ارتفاع سرعة الدوران ، نتيجة لوجود عزم دوران تعجيل (accelerating torque) ، إذا قل الحمل وتغلب عزم الدوران المحرك ، وإما إلى انخفاض فى سرعة الدوران ، نتيجة لوجود عزم دوران تقصير ، إذا زاد الحمل وتغلب عزم الدوران المضاد . فاذا كان المحرك عاملا على الجزء المتزن من منحنى خصائصه (stable part of the torque - speed Characteristic) الذى يربط بين السرعة وعزم الدوران ، فان تغيير السرعة سوف يؤدى الى تحرك نقطة التشغيل الى الموقع الذى يحدث فيه التوازن الديناميكى مرة أخرى بين عزم الدوران المضاد الجديد ، الذى حدده الحمل ،

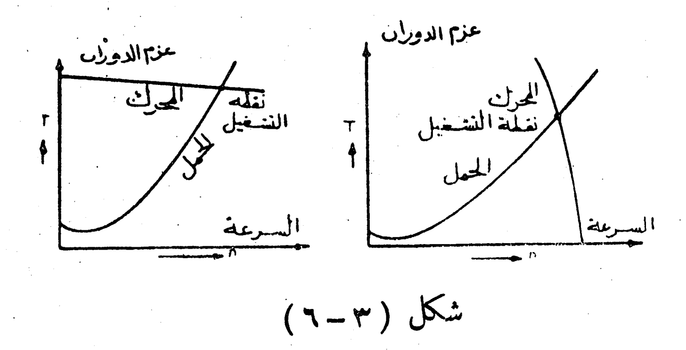
وعزم الدوران المحرك الذى تحددت قيمته عند نقطة التشغيل الجديدة . وإذا كان المراد تغيير الحمل مع ثبوت سرعة الدوران ، فلا بد من استخدام الوسائل المتاحة فى دائرة المحرك لإعادة سرعة الدوران الى قيمتها الأولى .

هذا ويتوقف قيمة عزم الدوران المحرك على نوع المحرك وكيفية توصيله الى الينبوع ، على حسب ما تمت دراسته بالنسبة للمحركات الكهربية ، فى حين تتوقف قيمة عزم الدوران المضاد ، التى يمكن أن تعتمد على سرعة الدوران ، على طبيعة العمل الذى تؤديه الآلة العاملة عموما . فبينما تحتاج آلات الرفع (lifting machines) الى عزم دوران ثابت تقريبا (مع اهمال الاحتكاك) عند جميع الأحمال ، نجد أن الهوايات (ventilators) تحتاج الى عزم دوران تتناسب قيمته مع السرعة . ويبين شكل (٢ — ٦) أمثلة للمنحنيات الخاصة بتغيير عزم الدوران لبعض الأحمال مع السرعة .



(شكل ٢ — ٦)

وللحصول على العلاقات الخاصة بالتحريك بين المحرك والآلات العاملة يلزمنا عادة الحصول على المنحنى الذى يربط بين قيمة عزم الدوران والسرعة لكل من المحرك والآلة العاملة ، حيث يمكن تحديد نقطة التشغيل ، مع الظروف المعطاة ، من تقاطع هذين المنحنيين كما فى شكل (٣ — ٦) . ويمكن أن يتم هذا كله أيضا بالطرق الحسابية .



شكل (٣ــ٦)

المتطلبات الخاصة بكل من المحرك والآلة العاملة للحصول على تحريك مناسب : تشتمل وسيلة التحريك الكهربى (Electric Drive) عادة على محرك كهربى (Electric motors) مناسب ، وأداة لنقل الحركة (transmission) الى الآلة العاملة (operating machine) ،ثم مجموعة من أجهزة التحكم (control system) التى تساعد على تكييف تشغيل الآلة العاملة على النحو المطلوب ، وذلك بالتحكم فى المحرك . ويمكن أن يقوم المحرك الكهربى الواحد بادارة الآلة العاملة الخاصة به فيقال ان التحريك منفصل (individual drive) ، بينما يطلق اسم التحريك الجماعى (group drive) على المحركات التى تقوم بادارة مجموعة من الآلات العاملة المختلفة . ويتعين على وسيلة التحريك أن تعطى أعلى قيمة للمخرج ، مع دقة تشغيل الآلة العاملة ، لكى تؤدى مهمتها على الوجه الأكمل ، كما يجب أن تكون وسيلة التحريك مضمونة الخدمات (reliable in service) سهلة الصيانة (easy maintainance) ، رخيصة بالنسبة لتكاليف تشغيلها واقامتها (cheap operational and installation costs) محدودة التفاصيل (limited details

وتنحصر المواصفات الضرورية لتميز وسيلة التحريك الكهربى فيما يأتى .

مقنن قدرتها بالكيلووات أو الحصان (KW or Horse power rating) السرعة الأساسية (base speed) ، العلاقة التى تربط بين عزم دوران المحرك سرعته والمدى الذى يمكن أن يتم تنظيم السرعة فى خـــلاله ، مقنن الضغط وطبيعتة على حسب ما إذا كان مترددا أو مستمراً ، طريقة البدء للمحرك الكهربى ، وكيفية حمايته ، ثم طريقة ربط المحرك الكهربى بالآلة العاملة لنقل الحركـة اليها .

وتجدر الإشارة هنا إلى أن استخدام وسيلة التحريك الكهربى بقدرة أقل من مقنن قدرتها بدرجة ملحوظة يسيء إلى معامل الجودة ، وكـذلك معامل القدرة للمحرك ، كما أن تشغيلها بقدرة أعلى من مقنن قدرتها ، على فرض احتمالها ذلك فى حينه ، يؤدى إلى تقصير عمرها واستهلاكها بمعدل أعلى كثيرا من المعدل الطبيعى .

هذا ويجب أن يراعى اختيار المحـــرك الـكهربى ، المستخدم فى وسيلة التحريك ، بحيث تتلائم خصائصه الميكانيكية (mechanical characteristics) ، وهى التى تتحدد على أســـاس منحنى عزم دورانه مع سرعته ، مع متطلبات الآلة العاملة لأداء حملها الميكانيكى على الوجه المطلوب . وهذا يستدعى دراية تامة بطرق تشغيل المحركات الـكهربية ، والتحكم في سرعتها ، وهـــو ما ماسنعرض له بصورة عامة فى فصل لاحق.

(٤ ــ ٦) أنواع وسائل التحريك الكهربى:

نستطيع أن نقسم وسائل التحريك الكهربى الى نوعين رئيسيين ، وهما الوسائل ثابتة السرعة (constant speed drives) ، والوسائل متغيرة السرعة (variable speed drives). وبالنسبة للنوع الأول يمكننا استخدام أى نوع

من المحركات الكهربية التي يمكن ان تحتفظ بسرعتها ثابتة مع جميع الأحمال مثل المحركات المتزامنة (synchronous motors) ، او تلك التي تتغير سرعتها تغييراً طفيفاً مع ازدياد الحمل ، ومثلها جميع انواع المحركات التى تمتلك خاصية التوازى (shant characteristic) مثل محركات التيار المستمر توصيل توازى ، او المحركات التأثيرية ثلاثية المراحل ، او محركات التيار المتردد ذات المبدلات توصيل توازى. وقد يكون من المناسب فى هذه الحالة تزويد المحرك بوسيلة لاسترجاع السرعة الى قيمتها الثابتة . اما بالنسبة للنوع الثانى من وسائل التحريك التى يتطلب ان تكون السرعة فيها متغيرة ، فان الغالب هو استخدام النوع الملائم من المحركات مع اجهزة التحكم المناسبة ، للحصول على السرعات المطلوبة .

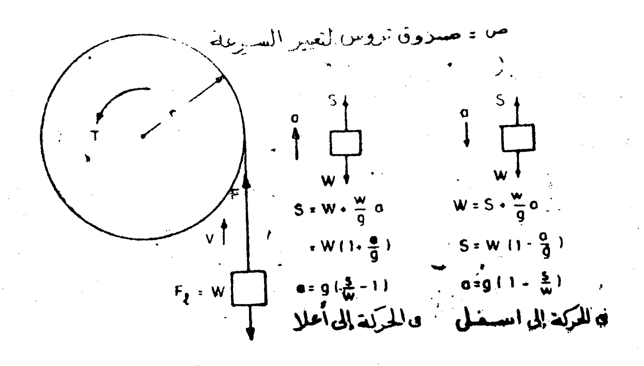
وعند اختيار المحرك الكهربى الملائم لوسيلة التحريك المطلوبة يجب مراعاة الظروف التى سوف تحيط به اثناء العمل جيداً ، فيؤخذ فى الاعتبار درجة حرارة الجو ودرجة رطوبته ، وكمية الغبار العالقة به ، وما يمكن ان يتسرب اليه من ابخرة او مواد قابلة للاشتعال . وعلى هذا الأساس يمكن تحديد نوع المحرك من حيث كونه مفتوحا (open) ، او مقفلا ذا تهوية ذاتية (enclosed self ventilated) ، او مقفلا ذا تهـــوية منفصـلة (enclosed separately ventilated) او ضد الانفجار (explosion proof) الى غير ذلك من انواع المحركات للاغراض المتعددة . كذلك قد تتسبب طريقة الربط بين المحرك والآلة العاملة (coupling) فى وضع مواصفات خاصة للمحرك الكهربى بالنسبة لعمود الادارة فيه .

(٥ - ٦) ديناميكا التحريك الكهربى (Dynamics of an electric drive)

يبذل المحرك الكهربى الطاقة اللازمة لتأدية التحريك المطلوب ، سواء كانت حركة الحمل على الآلة العامله خطية (linear motion) ، او دورانية (rotary motion) . ونظراً لأننا سوف نكون فى حاجة الى تتبع الأفعال

(actions) وردود الأفعـــال (reactions) المقابلة لها فى الأجزاء المختلفة من وسيلة التحريك الـكهربى ، مع أخذ القوى وعزم الدوران التى تتحـكم فى هذه الأجزاء ، فى أثناء دراسة فترة التحريك ، فى الاعتبار ، فانه يتعين علينا أن نحدد القواعد الأساسية الخاصة بديناميكا الحركـة (Dynamics of motion) التى سوف نستعين بها فى هذه الدراسة ، وذلك بالنسبة لكل من نوعى الحركة. هذا مع مراعاة أن حركـة الحمل الخطية سوف تنتقل فى النهاية إلى عمود إدارة المحرك الكهربى على شكل حركـة دورانية ، وهو النوع الوحيد من الحركـة الذى يمكن أن يمدنا به هذا المحرك . وقد نحتاج لذلك إلى ترتيبات خاصة ، كما سيرد ذكره فيما بعد.

١ ــ قواعد التحريك الخطى : نفرض أن المـــراد رفع حمل وتحريكه تحريكا خطياً وزنه عبارة عن w كيلوجرام، وكتلته m كيلوجرام.ثانيه٢/متر [باستخدام مجموعة الوحدات متر ــ كيلوجرام ــ ثانية (MKS system of units)] بحيث تكون سرعة الحركة هى v متر/ ثانية . إذا كانت قوة الرفع التى تبذلها وسيلة التحريك هى F كيلو جرام ، وإذا فرضنا أن الوزن W يضاد الحركة بالقوة F_1 ($W = F_1$ كيلو جرام) ، شكل (٤ ــ ٦) وأن قـوة المقاومة الناشئة عن الاحتكاك هى F_f فان المعادلة للحركـة الديناميكية تكون



شكل (٤ ــ ٦)

$$F = F_l + m\frac{dv}{dt} + F_f \qquad (٦ — ١)$$

حيث $m\frac{dv}{dt}$ هى القوة النيوتينية (Newton's Force) أو قوة القصور الذاتى التى تعاكس بها كتلة الجسم الحركة ،على حسب قانون نيوتن . وعندما تكون الحركة منتظمة السرعة ثابتة القيمة ، فان $\frac{dv}{dt}$ تساوى صفراً ، ولا يوجد تأثير القصور الذاتى للجسم . كما أن F_f يمكن اهمالها فى بعض الأحيان .

٢ ــ قواعد التحريك الدورانى : إذا أصبحت الحركة دائرية باستخدام طارة ، كما هو مبين فى شكل (٤ ــ ٩) ، فان T_l يكون عبارة عن عزم الدوران المعاكس بالكيلوجرام . متر الذى يسببه وزن الجسم ، حيث نجد أن العلاقة بين T_l , F_l هى

$$T_l = F_l \times r \quad K.g.m \qquad (٦ - ٢)$$

حيث r بالمتر هو نصف قطر الطارة التى تحول الحركة الخطية إلى دورانية .

فاذا كانت T هى عبارة عن عزم الدوران الذى تبذله وسيلة التحريك عند الطارة بالكيلوجرام . متر و T_f هو عزم الدوران المقاوم الناشىء بفعل الاحتكاك (يمكن اهماله فى بعض الأحيان) و J تمثل عزم القصور الذاتى الناشىء عن فعل الكتلة m (أو الوزن W) و هى زاوية نصف قطرية/ثانية. ($\omega = 2\pi \frac{n}{60}$) حيث n سرعة دوران الطارة باللفة فى الدقيقة و ω سرعة الدوران الزاوية المناظرة للسرعة الخطية v ($\omega = \frac{v}{r}$ radians/sec).

تصبح معادلة الحركة الدورانية عبارة عن :

$$T = T_l + J \frac{d\omega}{dt} + T_f \qquad (٣-٦)$$

باستخدام عزم الحدافة $\frac{G D^2}{4 g}$ (fly - Wheel moment) بدلا من J في المعـــادلة (٣ — ٦) [راجع صفحة ٢٦٥ من كـتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية للمؤلف] و $\omega = 2\pi \frac{n}{60}$ نجد أن:

$$T = T_l + \frac{GD^2}{4g} \frac{d\omega}{dt} + T_f = T_l + \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} + T_f$$

(٤ — ٦)

هذا ويمكن لوسيلة التحريك الكهربى ، فيما يتعلق بالمعادلة (٤ ـ ٦) ، أن أن تتواجد فى إحدى الحالات الآتية :

أ ـ $T > T_l + T_f$ ، وهـذا يعنى أن $\frac{d\omega}{dt} > 0$ ، أى أن وسيلة التحريك فى حالة تعجيـل ، وسرعتها فى إزدياد ، لـكى تدرك سرعة التشغيل ، عادة.

ب ـ $T < T_l + T_f$ ، وهذا يعني أن $\frac{T\omega}{dt} < 0$ ، أى أن وسيلة التحريك في حالة تقصير ، وسرعتها فى انخفاض تمهيداً لإيقافها ، عادة.

جـ ـ $T = T_l + T_f$ ، وهذا يعنى أن $\frac{d\omega}{dt} = 0$ ، أى أن وسيلة التحريك أصبحت تعمل بسرعة ثابتة أو فى حالة سكون ، إذا لم تكن قد بدأت العمل بعد .

ابتدا(٦ من ٦) القواعد الخاصة بنسبة عناصر الحركة فى وسيلة التحريك إلى عمود إدارة المحرك الكهربى : ε_1 ، ε_2 ، ε_3 ... الخ ، نجد ان عزم

الدوران T_m ، اللازم بذله على عمود ادارة المحرك ، للحصول على عزم دوران الحمل T_l عبارة عن

Rules for referring all elements of motion in an electric drive to the motor axis.

عندما تتعدد عناصر الحركة وأشكالها فى وسيلة التحريك الواحدة ، T_l $\eta_1 \eta_2 \eta_3 \cdots \times {}_1\varepsilon \varepsilon_2 \varepsilon_3 \cdots \quad \eta_t \times \varepsilon_t$

ويكون مصدرها كلها محرك كهربى واحد ، باستخدام وسائل نقل الحركة الميكانيكية ، يصبح من اللازم معرفة تأثير عناصر التحريك المختلفة على عمود إدارة هذا المحرك ، لكى يمكن معرفة عزم الدوران المطلوب منه بذله ، مع سرعة الدوران المناسبة ، وهى أهم المواصفات اللازم توفرها لتمييز المحرك .

η_t هى معامل الجودة الكلى للنقل الميكانيكى وهو عبارة $\eta_t = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \cdots$

ويكون سريان القدرة P (power flow) من جزء إلى آخر فى وسيلة التحريك ، مع اعتبار معامل جودة الأداة η ، التى تنقلها بين الجزءين ، هى دليلنا الأساسي فى الحساب . وذلك إذا ما اختلفت السرعة أو شكل الحركة من جزء إلى الجزء التالى. n_1 n_2 n_3

$$\times \frac{n_{n-1}}{n_n} \times \frac{n_n}{n} = \frac{n_m}{} \qquad (٦-٧)$$

وفى هذه الحالة تستخدم العلاقة المعروفة $P = T\omega$ ، التى تربط بين القدرة وعزم الدوران والسرعة الزاوية فى كل جزء منها . فاذا لم تكن الطارة تحقق تشكيل قوة الحمل على سبيل المثال ، تدور على عمود إدارة المحرك نفسه ، التى إنما تنقل الحركة الدورانية إليه من عمود إدارة المحرك عن طريق التداخل أو جهاز ميكانيكى مناسب (صندوق تروس عادة Gear Box) ، فاننا نستطيع أن ننسب حركة الطارة الى عمود ادارة المحرك على النحو التالي : نفرض أن عزم دوران الحمل T_l كيلوجرام . متر على محور الطارة التى تدور بسرعة n لفة فى الدقيقة ، يؤدى الى عزم الدوران الذى قيمته T_m كيلوجرام . متر على عمود ادارة المحرك الذى يدور بالسرعة n_m لفة فى الدقيقة ، وفى ذلك عند انتقال الحركة من محور الطارة الى عمود ادارة المحرك باستخدام صندوق تروس معامل جودته

$$P_l = 9.81\ F_l \times v \qquad (٦-٨)$$

$$P = \eta_c\ P_m = 9.81\ \eta_c\ T_m \times 2\pi \frac{n_m}{60}\eta_g$$

لولا وجود مفقودات فى صندوق التروس لما تغيرت قيمة القدرة التى تسرى من عمود إدارة المحرك الى الطارة ، ولاستطعنا أن نقرر أن $P = T_l \omega = T_m \omega_m$ ، ولكن نظراً لوجود الفقد فى القدرة فى صندوق التروس نجد أن :

القدرة التى يعطيها المحرك على عمود الإدارة هى بالوات:

$$P_m = 9.81 \ T_m \times 2 \pi \ \frac{n_m}{60}$$

القدرة التى تنتقل عبر صندوق التروس الى الطارة هى :

$$P_l = \eta_g \ P_m$$

وحيث أن P_l بالوات أيضاً عبارة عن:

$$P_l = 9.81 \ T_l \times 2\pi \ \frac{n}{60}$$

$$\therefore 9.81 \ \eta_g \ T_m \times 2\pi \ \frac{n_m}{60} = 9.81 \ T_l \times 2\pi \ \frac{n}{60}$$

$$\therefore T_m = \frac{T_l}{\eta_g} \times \frac{n}{n_m} = \frac{T_l}{\eta_g \, \varepsilon} \left[\varepsilon = \frac{n_m}{n} \right]$$

(٥ - ٦)

ε هى عبارة عن نسبة سرعة دوران عمود ادارة المحرك الى سرعة الدوران على عمود الادارة التالى بعد نقل الحركة باستخدام الإداة ذات معامل الجودة η_g . فاذا تم نقل الحركة بهذه الطريقة مرات متتالية باستخدام ادوات نقل الحركة ، ابتداء من المحرك وفى اتجاه الحمل ، ذات معاملات الجودة η_1 ، η_2 ، η_3 ... الخ على التوالى ، وكانت نسب سرعات الدوران

ابتداء من عمود ادارة المحرك الى عمود الادارة الذى يليه ، ثم منه إلى عمود الادارة التالى ، وهكذا هى ε_1 ، ε_2 ، ε_3 ... الخ ، نجد ان عزم الدوران T_m ، اللازم بذله على عمود ادارة المحرك ، للحصول على عزم دوران الحمل T_l عبارة عن

$$T_m = \frac{T_l}{\eta_1 \eta_2 \eta_3 \cdots \times {}_1\varepsilon \varepsilon_2 \varepsilon_3 \cdots} = \frac{T_l}{\eta_t \times \varepsilon_t}$$

(٦ - ٦)

حيث η_t هى معامل الجودة الكلى للنقل الميكانيكى وهو عبارة

$$\eta_t = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \cdots$$

كما ان :

$$\varepsilon_t = \frac{n_m}{n_1} \times \frac{n_1}{n_2} \times \frac{n_2}{n_3} \times \cdots \times$$

$$\times \frac{n_{n-1}}{n_n} \times \frac{n_n}{n} = \frac{n_m}{n} \qquad (٦ - ٧)$$

واذا كان الحمل يؤدى بحركة خطية بسرعة مقدارها v متر / الثانية تحت تأثير قوة الحمل F_l كيلو جرام (كما هى الحال عند رفع الوزن W ، التي سبق الإشارة اليها فى شكل ٤ ـ ٦) فان القدرة التى يحتاج اليها الحمل P_l لرفعه تكون فى هذه الحالة :

$$P_l = 9.81\ F_l \times v \qquad \text{وات} \ \cdots \ (٦ - ٨)$$

فاذا كانت η_c هى معامل جودة الأداة التى تتحول فيها حركة المحرك الدورانية الى حركة خطية ، وكانت P_m هي قدرة المحرك كما سبق ، نجد ان

$$P = \eta_c\ P_m = 9.81\ \eta_c\ T_m \times 2\pi \frac{n_m}{60}$$

$$\therefore \quad T_m = 9.53 \frac{F_1 \; v}{\eta_c \; n_m} \text{ Kg.m.} \qquad (٦-٩)$$

ومنها يمكن تحديد قدرة المخرج اللازمة للمحرك P_m بالعلاقة التقليدية بين القدرة وعزم الدوران .

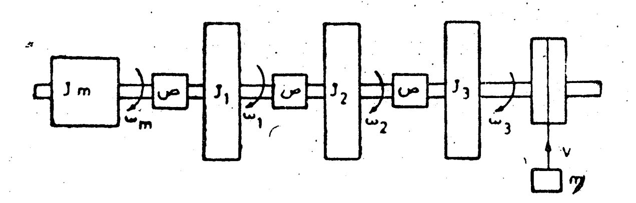
$$P_m = 9.81 \; T_m \; \omega_m = \frac{T_m \; n_m}{0.975} \quad \text{وات}$$

$$= \frac{T_m \; n_m}{975} \quad \text{كيلووات} \qquad (٦-١٠)$$

وتجدر الاشارة هنا الى ان المعادلات من (٥ – ٦) الي (١٠ – ٦) تربط ما بين عـزم الدوران النافع (useful torque) T_1 او القـوة النافعة (useful force) F_1 التى يستفاد بها فى الحمل وعـــزم دوران أو قدرة المحرك المطلوبة ، فاذا أردنا أخذ مفقودات الاحتكاك التى تصاحب حركة الحمل فى الحسبان تضاف T_f إلي T_1 أو F_f الى F_1 فى هـذه المعـادلات ، وذلك عندما يكون التحريك منتظما ، أى أن السرعة ثابتة بدون تعجيل أو تقصير . فاذا لم تكن السرعة منتظمة ،فسوف يظهر حد ثالث مع T_1 أو F_1 حيث نجد أننا نستخدم فى الحقيقة T كما تعطيها المعادلة (٣ – ٦) و F كما تعطيها المعادلة (١ – ٦) بدلا من $T_1 + T_f$ أو $F_1 + F_f$. وفى هـذه الحالة سوف نحتاج إلى نسبة عزم القصور الذاتى J او عزم الحـدافة $G \frac{D^2}{4}$ إلى عمـــود إدارة المحرك ، حيث ننسب عناصر الحركة فى وسيلة التحريك إلى هذا العمود . ويتم ذلك عن طريق استخدام العلاقة الخاصة بطاقة الحركة $J \frac{\omega^2}{2}$ بالنسبة للكتل الدائرة و $\frac{m \; v^2}{2}$ بالنسبة للكتل المتحركـة على النحو الآتى :

نفرض، كما هو مبين في شكل (٥ – ٦) ، ان الآلة العاملة ترفع ثقلا وزنه

W (كتله m) بسرعة v متر / الثانية وان التحريك ينقل اليها من المحرك



شكل (٥ — ٦)

الكهربى على مرحلتين أو أكثر ، باستخدام أداتين ميكانيكيتين M_1 و M_2 أو أكثر ، بحيث يكون عزم القصور الذاتى للكتل التى على محور المحرك J_m ، والسرعة الزاوية ω_m ، وتتغير السرعة إلى ω_1 على المحور التالى ، ويكون عزم القصور الذاتى للكتل التي عليه J_1 ، ثم تتغير السرعة إلى ω_3 على المحور الواصل الى الآلة العاملة ، ويكون عزم القصور الذاتى للكتل التى عليه J_3 .

من الواضح ان المحرك الكهربى هو مصدر طاقة الحركة الكامنة فى جميع الأجزاء المتحركة فى وسيلة التحريك ، فاذا فرضنا عزم قصور ذاتى مكافىء J_d على عمود إدارة المحرك، للحصول على طاقة حركة $J_d \frac{\omega^2_m}{2}$ بعزم القصور الذاتى هذا ، يغطى كل احتياجات طاقة الحركة فى الأجزاء المختلفة من وسيلة التحريك ، نجد ان:

$$J_d \frac{\omega^2_m}{2} = J_m \frac{\omega^2_m}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \frac{\omega^2_2}{2} + \frac{1}{2} m v^2$$

بقسمة هذه المعادلة على $\frac{\omega^2_m}{2}$

$$= J_m + \frac{J_1}{\sigma_1^2} + \frac{J_2}{\sigma_2^2} + m \left(\frac{v}{\omega_m} \right)^2 \quad (١٢ - ٦)$$

حيث $\sigma_1 = \frac{\omega_m}{\omega_1}$, $\sigma_2 = \frac{\omega_m}{\omega_2}$

يعطى المصنع ، من بين معلومات التصميم المصاحبة للآلة ، عزم الحدافة GD^2 بالكيلوجرام متر٢ ، بدلا من عزم القصور الذاتى للكتل التى تدور على محور إدارة المحرك الكهربى، وقد سبق ذكر ذلك فى كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية (صفحة ٢٦٥) للمؤلف . ونحصل على عزم الحدافه فى الواقع باعتبار أن طاقة الحركة الكامنة فى الكتل الدائرة على عمود الادارة للمحرك $J_m \frac{\omega^2_m}{2}$ كيلو جرام متر٢ تنشأ بفعل وزن اعتبارى مكافىء مركز فى نقطة قيمته G كيلو جرام ، يدور على محيط دائرة قطرها D متر بنفس السرعة الزاوية ω_m زاوية نصف قطرية فى الثانية ، حول محور عمود إدارة المحرك . وبمساواة طاقتى الحركة الكامنة الاعتبارية والحقيقية ، نحصل على العلاقة بين عزم القصور الذاتى J_m وعزم الحدافه GD^2 فى المحرك على النحو التالى .

الطاقة الكامنة E_n كيلو جرام متر فى الكتل الدائرة على عمود إدارة المحرك باستخدام كل من عزم القصور الذاتى J_m الوزن الاعتبارى G هى

$$E_n = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \frac{G}{g} \left(\frac{\pi D n_m}{60}\right)^2 = \frac{1}{2} J_m \left(\frac{2 \pi n_m}{60}\right)^2$$

(١٣ - ٦)

$$\therefore J_m = \frac{GD^2}{4g} , \quad GD^2 = 4g J_m \qquad (١٤ - ٦)$$

نستطيع الآن أن نستخدم عزم الحدافة المناظر بدلا من عزم القصور الذاتى على كل محور دوران فى الحالة السابقة ، حيث نجد أن عزوم الحدافة المناظرة

لعزوم القصور الذاتى على المحاور المختلفة عبارة عن :

$$J_d = \frac{(GD^2)_d}{4g} \quad , \quad J_m = \frac{(GD^2)_m}{4g}$$

$$, \quad J_1 = \frac{(GD^2)_1}{4g} \quad , \quad J_2 = \frac{(GD^2)_2}{4g}$$

(١٥-٦)

أما بالنسبة للوزن W فاننا نحصل على $(GD^2)_1$ المكافئة منسوبة إلى عمود إدارة المحرك مباشرة ، وذلك باعتبار عزم القصور الذاتى المناظر J_1 ، مع سرعة الدوران الزاوية ω_m على عمود إدارة المحرك، والمساواة بين طاقتى الحركة الكامنة فى الوزن المتحرك ، وباستخدام عزم الحدافة المنسوب إلى محور إدارة المحرك ، على النحو التالى:

$$\frac{J_1 \ \omega^2_m}{2} = \frac{m \ v^2}{2}$$

$$\therefore \ \frac{(GD^2)_1}{4g} \ \frac{\omega^2_m}{2} = \frac{W}{g} \cdot \frac{v^2}{2}$$

$$\therefore \ (GD^2)_1 = 4 \times \left(\frac{60}{2\pi}\right)^2 \frac{W \ v^2}{n^2_m} = 365 \ \frac{Wv^2}{n^2_m}$$

(٦ - ١٦)

بالتعويض من المعادلتين (١٥ - ٦) و (١٦ - ٦) فى المعادلة (١١ - ٦) نجد أن ؛

$$(GD^2)_d = \left[(GD^2)_m + 365 \ \frac{Wv^2}{n^2_m}\right] + \frac{(GD^2)_1}{\sigma_1^2} + \frac{(GD^2)_2}{\sigma_2^2}$$

(٦-١٧)

نضرب مثلا لطريقة حساب طاقة الحركة الكامنة في محرك كهربي قدرته ٥٠ كيلووات ويدور بسرعة ١٠٠٠ لفة في الدقيقة علماً بأن عزم الحدافة GD^2 (كما هو موجود في مواصفات المحرك المعطاة في نشرة المصنع) يساوى ١٠ كيلوجرام م٢ . باستخدام الشق الأول من المعادلة (١٣ – ٦) نجد أن مقدار طاقة الحركة الكامنة في الكتل الدائرة على عمود إدارة المحرك بالسرعة المعطاة

$$E_n = 10 \times \frac{\pi^2 \times (1000)^2}{7200 \times 9.81} = 1400 \text{ Kg.m.}$$

$$= 1400 \times 9.81 = 13750 \text{ Joules or Watt sec.}$$

(٦ – ٦) تعيين عزم الحدافة :

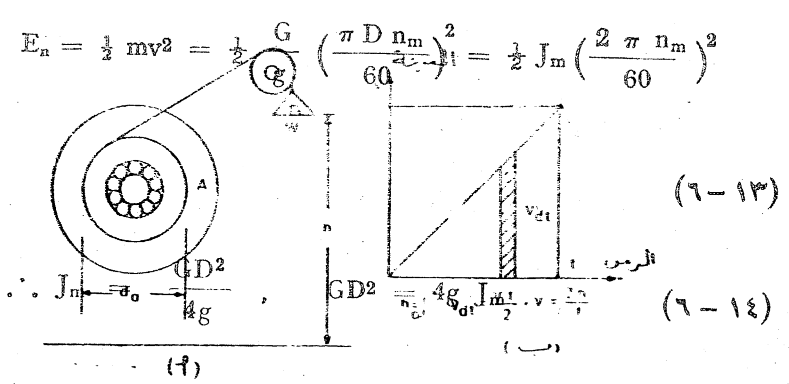
قد يكون من المناسب، في هذه المرحلة، إعطاء فكرة مبدئية عن كيفية تحديد قيمة GD^2 لمحرك معين . يبين شكل (٦ – ٦) طريقة مبسطة لذلك .

حيث $\omega_1 = \omega_m$ ...

يعطى المصنع، من بين معلومات التصميم المصاحبة للآلة، عزم الحدافة GD^2 بالكيلوجرام متر٢، بدلاً من عزم القصور الذاتي للكتل التي تدور على محور إدارة المحرك الكهربي، وقد سبق ذلك في كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية (صفحة ٢٦٥) للمؤلف . ونحصل على عزم الحدافة في الواقع باعتبار أن طاقة الحركة الكامنة في الكتل الدائرة على عمود الإدارة للمحرك تنشأ بثقل اعتباري مكافئ G كيلو جرام مركز في نقطة قيمته G كيلو جرام، يدور على محيط دائرة قطرها D متر بنفس السرعة الزاوية ω_m زاوية قطرية في الثانية، حول محور عمود إدارة المحرك . وبمساواة طاقة الحركة الكامنة الاعتبارية والحقيقية، نحصل على علاقة بين عزم القصور الذاتي وعزم الحدافة GD^2 في المحرك على النحو التالي :

الطاقة الكامنة E_n كيلو جرام متر في الكتل الدائرة على عمود إدارة المحرك باستخدام كل من عزم القصور الذاتي J_m والوزن الاعتباري G هي

$$E_n = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \frac{G}{g} \left(\frac{\pi D n_m}{60}\right)^2 = \frac{1}{2} J_m \left(\frac{2 \pi n_m}{60}\right)^2 \qquad (١٣ – ٦)$$



$$\therefore J_m = \frac{GD^2}{4g}, \quad GD^2 = 4g J_m \qquad (١٤ – ٦)$$

(أ) (ب)

نستطيع الآن أن نستخدم عزم الحدافة المناظر بدلا من عزم القصور الذاتي على كل محور دوران في الحالة السابقة (حيث شكل ٦ – ٦ جـ). أن عزوم الحدافة المناظرة

يوضع عمود الإدارة ، كما هو بكل ما عليه من أثقال المنتج ، على كرسيين ، بحيث يراعى أن تكون مقاومة الإحتكاك أقـل ما يمكن (أو يستخـدم بعد ذلك معامل لأخذ فعـل الإحتكاك فى الاعتبار) . وفى اثناء هبوط الثقل W كيلو جرام ، بفعل الجاذبية الأرضية ، يدور المنتج الذى قطره d_a متر ويفك الحبل الملفوف حوله ، المربوط فى نهايته الثقل . يرصد الزمن t بالثانية اللازم لهبوط الثقل المسافة h متر حتى لحظة اصطدامه بالأرض .

تحسب قيمة GD^2 كما يأتى : يبدأ الثقل حركته من السكون عند انطلاقه من أعلى نقطة ، ويصل إلى أقصى سرعة له عند اصطدامه بالأرض ، وتزداد السرعة ازديادا خطيا تحت تأثير عجـــلة ثابتة a فى أثنـاء ذلك ، مقدارها $a = g\left(1 - \frac{S}{W}\right)$ ، حيث S قيمة الشد فى الحبل (MKS units) .

وتكون السرعة عند اصطدام الثقل بالارض v ، كما يبين شكل (٦ - ٦) ب هى ضعف السرعة المتوسطة التى تساوي $\frac{h}{t}$ أى أن :

سرعـة الثقل عند اصطدامه بالارض (وهى السرعـة المحيطية للمنتج)

$$v = \frac{2h}{t} \ m / sec$$

سرعة دوران المنتج المناظرة n_m لفة فى الدقيقة

$$n_m = \frac{60 \ v}{\pi \ d_a} \qquad (١٩ - ٦)$$

وتكون طاقة الحركة الكامنة فى الكتل الدائرة على محور إدارة المحرك فى هذه اللحظة عبارة عن التغير الذى حدث فى طاقـــة الوضع للثقل W بهبوط المسافة h . وبالاستعانة بالمعادلة (١٣ - ٦) للتعبير عن طاقـة الحركة الكامنة، بدلالة الوزن الاعتبارى G والقطر الاعتبارى D لوسيلة التحريك منسوبة كلها إلى عمود إدارة المحرك ، نجد ان:

$$Wh = \frac{1}{2} \frac{G}{g} \left(\frac{\pi D n_m}{60} \right)^2$$

بالتعويض عن n_m بالقيمة التى حصلنا عليها :

$$\therefore \left(GD^2 \right)_d = \frac{7200 \; g \; Wh}{\pi^2 \, n^2_m} \quad Kgm^2$$

أو

$$\left(GD^2 \right)_d = \frac{g \; W \; d^2_a \; t^2}{2h} \quad Kgm^2$$

(٢ – ٦)

نضرب مثلا بحالة يكون فيها :

$d_a = 10$ cms ، $t = 20$ sec ، $h = 1$ m ، $W = 2$ Kg

$$v = \frac{2h}{t} = \frac{2 \times 1}{20} = 0.1 \text{ m/sec} ,$$

$$n_m = \frac{60v}{\pi d_a} = \frac{60 \times 0.1}{\pi \times 0.1} = 19.1 \text{ rev/min}$$

$$\left(GD^2 \right)_d = \frac{7200 \; g \; Wh}{\pi^2 n^2_m} = \frac{7200 \times 9.81 \times 2 \times 1}{\pi^2 \times (19.1)^2}$$

$$= 39.3 \; K_{gm}{}^2$$

$$\text{or} \; , \left(CD^2 \right)_d = \frac{gW \; d_a^2 \; t^2}{2h} = \frac{9.81 \times 2 \times 0.01 \times 400}{2 \times 1}$$

$$= 39.24 \; K_{gm}{}^2$$

وإذا أردنا حساب $\left(GD^2 \right)_m$ للمنتج فقط نطبق المعادلة (١٧ – ٦)

حيث

$$\left(GD^2 \right)_m = \left(GD^2 \right)_d - 365 \frac{W \, v^2}{n^2_m}$$

$$365 \frac{W v^2}{n^2_m} = \frac{2 \times 0.01}{365} \times 365 = 0.02 \text{ Kg.m.}^2$$

$$\left(GD^2 \right)_m = 39.24 - 0.02 = 39.22 \text{ Kg.m}^2$$

يلاحظ أن الجزء الأكبر من طاقة الوضع التي يفقدها الوزن W ، بهبوطه المسافة متر ، يتحول إلى طاقة حركة في المنتج الدائر ، بينما جزء صغير جدا هو الذى يتحول إلى طاقة حركة في الوزن نفسه ، يتمثل في سرعته ١٩ر٠ متر/ الثانية التي اكتسبها من خلال سقوطـه . وفي الحقيقة أن الوزن لو لم يكن معوقا بعزم القصور الذاتى الكبير نسبيا للمنتج، نتيجة ربطه به ، وكان سقوطه بمفرده ، لكانت السرعة التى يصل إليها عبارة عن $\sqrt{2gh} = v =$ ٤٣ر٤ متر / الثانية ، بالقياس إلى ١ر٠ متر / الثانية كما وجدنا من قبل .

يمكن الحصول على قيمة تقريبية مناسبة لعزم الحدافة $(GD^2)_m$ للمحرك باجراء التجربة التالية: يوصل المحرك ، بدون حمـــل على عمود إدارته ، إلى الينبوع وتقاس قـدرة المدخل P_0 وات ، عندما يكون دائرا بسرعته المعتادة n_{mo} لفة في الدقيقة . تستهلك هذه القدرة في مفقودات الحديد P_{vfe} والمفقودات النحاسية الطفيفة P_{vcuo} ، الناشئة عن تيار اللاحمل الصغير وكذلك في المفقودات الميكانيكية P_{mo} ، التي يمكن اعتبارها قدرة المخرج الميكانيكية على عمود إدارة المحرك في هذه الحالة . وعلى هذا الأساس يمكن ايجاد قيمة P_{mo} بضرب قيمة P_0 في قيمة معامل جودة المحرك المنخفض η_0 ، الذى نحصل عليه من منحنى معامـل جودة المحرك مع القدرة ، المعطي ضمن مواصفات التصميم للمحرك من المصنع . عند لحظة فصل المحرك من الينبوع يعمل عزم الدوران T_{mo} الناشيء عن المفقودات الميكانيكية P_{mo} عند سرعة الدوران n_{mo} على خفض سرعة المحرك ، تمهيدا لإيقافه تحت تأثير مقاومة الإحتكاك ويعمل عـزم القصور الذاتي ، أو عزم الحدافـة المضاد مع التقصير الناشيء عن انخفاض

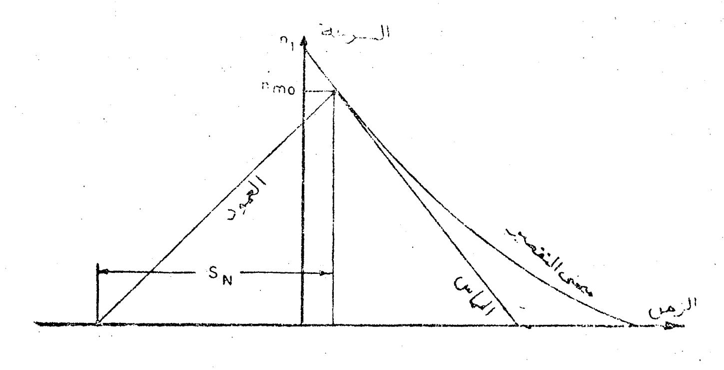
السرعـة بحيث يحدث توازن ديناميكى ، يتحقق بمعادلة الحركة الديناميكية التالية :

$$T_{mo} = \frac{0.975\ P_{mo}}{n_{mo}} = J_m \frac{d\omega_{mo}}{dt}$$

$$= \frac{(GD^2)_m}{4g} \frac{2\pi}{60} \frac{dn_{mo}}{dt}$$

$$= \frac{(GD^2)_m}{375} \frac{dn_{mo}}{dt} \ \text{Joules} \qquad (٢٠ - ٦)$$

يمكننا ايجـاد قيمة $\frac{dn_{mo}}{dt}$ ، من منحنى التقصـير للمحـرك (retardation curve) ، الذى تحصل عليه برصد سرعة المحرك مع الزمن الذي يمضى بعد لحظة الفصل ، وذلك بايجاد ميل المماس للمنحنى عند السرعة n_{mo} . ويمكن الحصول على نتائج أكثر دقة برفع الضغط على المحرك بحيث تصل سرعته إلي n_1 (اذا كانت سرعته تتوقف علي قيمة الضغط) ،أعلى قليلا من n_{mo} ، ثم فصله من الينبوع وأخذ قراءات منحنى التقصير ، شكل (٧ - ٦) بذلك نحصل على عزم الحدافة المطلوب حيث يكون :



شكل (٧- ٦)

$$(GD^2)_m = \frac{0.975 \times 375 \ \eta_0 \ P_0}{n_{mo} \ \frac{dn_{mo}}{dt}} \times \frac{365 \ \eta_0 \ P_0}{S_N} \qquad (٦ - ٢١)$$

حيث S_N هو طول تحت العمود (length of subnormal) لمنحنى التقصير للمحرك ، كما هو مبين فى شكل (٧ ـ ٦)

عند حساب عزم الحدافة الكلى لوسيلة التحريك منسوبا إلى عمود إدارة المحرك $(GD^2)_d$ يؤخذ $(GD^2)_m$ و $(GD^2)_l$ في الاعتبار فقط عادة مع ضرب الأول فى العامل k ، الذى تتراوح قيمة بين ١ ر ١ ، ١٫٣ ، لأخذ تأثير صناديق التروس والطارات الموجودة فى وسيلة التحريك فى الحسبان . فى هذه الحالة يستعاض عن المعادلة (١٧ ـ ٦) بالمعادلة الآتية:

$$(GD^2)_d = k \ (GD^2)_m + \frac{(GD^2)_l}{\varepsilon^2{}_l} \left[\varepsilon_l = \frac{n_m}{n_l} \right]$$

$$= k \ (GD^2)_m + 365 \ \frac{Wv^2}{n^2{}_m} \qquad (٦ - ٢٢)$$

$(GD^2)_l$ فى المعادلة (٢٢ ـ ٦) هى عزم الحدافة للحمل على محوره ، وبقسمتها على $\varepsilon^2{}_l$ تصبح منسوبة الى عمود ادارة المحرك ، بينما $(GD^2)_l$ فى المعادلة (١٦ ـ ٦) هى القيمة منسوبة الى عمود إدارة المحرك مباشرة.

يمكن استخدام المعادلتين (١٨ ـ ٦) و (٢٢ ـ ٦) للحصول على طاقة الحركة الكلية الكامنة فى جميع الأجزاء الدوارة فى وسيلة التحريك En_d

$$En_d = (GD^2)_d \ \frac{\pi^2 \ n^2{}_m}{7200g} = \left[k \ (GD^2)_m + \frac{(GD^2)_l}{\varepsilon^2{}_l} \right] \frac{\pi^2 \ n^2{}_m}{7200 \ g}$$

(٦ - ٢٣)

مثال محلول ١ :

a 3-phase 6-pole detla connected inductiou motor is used in a drive for raising a wieght of 6 tons at a speed of 1.5 m/sec in an arrangment similar to that in fig (5 —6). The motor is counected to a 3-phase 3000 V,50 HZ suppIy. Find the iine and phase currents of the motor, assuming an overall efficiency for the drive of 0.8 and a power factor of 0.82

سرعة التزامن فى المحرك:

$$n_{ms} = \frac{60\ f}{p} = \frac{60 \times 50}{3} = 1000 \text{ r.p.m.}$$

عزم الدوران اللازم بذله في المحرك بسبب حركة الثقل W ، باستخدام المعادلة (٩ – ٦):

$$T_m = 9.53 \frac{W\ v}{\eta_c\ n_m} = 9.53 \times \frac{6000 \times 1\ 5}{0.8 \times 1000} = 107.5 \text{Kg.m.}$$

قدرة المدخل للمحرك باستخدام المعادلة (١٠ – ٦):

$$P_m = \frac{T_m\ n_m}{0.975} = \frac{107.5 \times 1000}{0.975} = 115200 \text{ W} = 115\ 2 \text{ KW}$$

يلاحظ أننا نستخدم سرعة دوران المجال المغناطيسى الدائر فى المحرك لأننا نحسب قدرة المدخل ، لا قدرة الخرج .

تيار الخط فى المحرك :

$$I_L = \frac{115200}{\sqrt{3} \times 3000 \times 0.82} = 27.1 \text{ A}$$

التيار المرحلي في المحرك :

$$I_{ph} = \frac{27.1}{\sqrt{3}} = 15.62 \text{ A}$$

مثال محلول ٢ :

For the drive arrangement shown in fig (5-6), with motor directly connectod to load shaft find the resultant fly-wheel moment referred to the motor shaft , assuming the following data : speed of motor shaft 720 r.p.m., Fly wheel moment mofotor armature 10 Kg.m², diameter of crane-drum 1m and its flywheel moment 60 Kg.m². Speed of raising a 3 ton load is 0.9 m/sec.

$$n_l = \frac{60 \times v}{\pi d} = \frac{60 \times 0.9}{\pi \times 1} = 17.2 \text{ r.p.m.}$$

$$\varepsilon_l = \frac{n_m}{n_l} = \frac{720}{17.2} = 41.8$$

باستخدام المعادلة (٢٢ – ٦) لإيجاد المطلوب ، مع اعتبار أن $k = 1.1$

$$(GD^2)_d = 1.1 \times 10 + \frac{60}{(41.8)^2} + 365 \times \frac{3000 \times (0.9)^2}{(720)^2}$$

$$= 11 + 0.03 + 17.15 = 28.18 \text{ Kg.m}^2$$

مثال محلول (٣) :

The input to the electric motor on no load in a special drive is 2.5 KW, when the motor shaft rotates at a speed of 980 r.p.m. The motor efficiency at this power consumption is supposed to be 0.7. If the speed of the drive drops from 1000 to 960 r.p.m. in 1.25 sec, when the supply voltage is slightly

raised and the motor is there after disconnected from the supply, find the equivalent flywheel moment of the drive reffered to the motor shaft

$$\frac{dn_{mo}}{dt} \backsimeq \frac{1000 - 960}{1.25} = \frac{40}{1.25} = 32 \quad \text{r.p.m./sec}$$

استخدام المعادلة (٢١ – ٦) نحصل على المطلوب :

$$(GD^2)_m = \frac{365 \ \eta_o \ P_0}{n_{mo} \ \frac{dn_{mo}}{dt}} = \frac{365 \times 0{,}7 \times 2.5 \times 10^3}{980 \times 320}$$

$$= 20.4 \ \text{Kg.m}^2$$

(٧ – ٦) زمن البدء الذى يستغرقه المحرك الكهربى (أو وسيلة التحريك بأ كملها) حتي تصل الى السرعة المعتادة

(Starting time taken by the motor, or the total drive, to attain normal speed

يستغرق المحرك الكهربى وقتاً معلوما حتى يصل الى سرعة الدوران العادية له . وتتوقف قيمة هذا الوقت على عزم دوران الكتل الموجودة على محور ادارة المحرك، وعزم دوران المحرك ، مما يترتب علية تعجيل معين له . وتختلف قيمة وقت البدء (starting time) هذا اذا كان المحرك متصلا بالآلة العـــاملة ، فى خلال فترة البدء ، أى قائماً بالحمل ، عما اذا كان يبدأ الدوران . بمفرده أى بدون الحمل ، ويكون الاختلاف ناشئا عن تغير قيمة عزم دوران الكتل المعجلة (accelerated masses) فى الحالتين . ونظراً لأن هذه الكتل سوف تمتلك كميات من الطاقة الكامنة ، التي تتوقف قيمتها على السرعة التى سوف تدور بها فى النهاية ، كما أن جزء مماثل من الطاقة سوف يتبدد ، على كل حال، مصاحباً عملية البدء على شكل مفقودات حرارية ،

كما سبق بيانه بالنسبة للقفص السنجابى على العضو الدائر للمحرك التأثيرى صفحة(٨٨) فى الباب الثانى ، فلا بد أن يمتلك المحرك قدرة معينة لكى تتم عملية البدء فى زمن معين . كذلك يجب أخذ الاحتياطات اللازمة لتفادى تراكم الحرارة المذكورة،بما يجعلها مصدر تلف لأى جزء من أجزاء المحرك ، أو الأجهزة المنظمة لحركته، باستخدام الوسائل الفعالة لزيادة معدل تبديدها، أو الحد من زيادة معدل توليدها،هذا ويتعرض المحرك فى خلال فترة البدء لظواهر التلاشىعادة (Transient phenomena) ،مما يستلزم التأكيد على دراسة معدلات نمو التيار المسحوب من الينبوع ، والمجال المغناطيسى المصاحب لوجوده ، للاطمئنان على عدم تعدى أى منهما الحدود المسموح بها ، فلا يصبح خطراً على أى جزء من أجزاء المحرك ، أو احدى الأجهزة المتصلة. وتجدر الإشارة هنا مرة أخرى الى ان مدى الخطورة الناشئة عن سريان تيار معين فى جزء من أجزاء الدائرة الكهربية ، بسبب الحرارة التى يبددهـا ، او المجال المغناطيسى الذى يصنعه ، لا تتوقف على حد معين لقيمته فقط ،وانما يجب أخذ الزمن ، الذى يستمر سريان التيار فيه عند هذا الحد ، أيضاً فى الاعتبار (راجع الباب الثانى صفحة ٨٩).

اذا افترضنا أن المحرك يمكن أن يبذل عزم دوران يكون متوسط قيمته فى خلال فترة البدء هو T_{st} كيلوجرام .متر ، وأن عزم دوران الحمـل المضاد على عمود ادارة المحرك هو T_l ، بنفس الوحدات ، وأن سرعة الدوران التى يصل اليها فى النهاية هى n_m لفة فى الدقيقة ، فى خلال زمن البدء t_{st} ثانية ، فانه قياساً على المعادلة (١٧ – ٢) صفحة ٢٦٩ من كتاب نظريات و تصميم الآلات الكهربية نجد أن : $(t_{st} = \theta_m)$

$$t_{st} \simeq \frac{(GD^2)_d}{36.5} \times \left(\frac{n_m}{100}\right)^2 \times \frac{1}{\frac{n_m\,(T_{st} - T_l)}{975}}$$

$$t_{st} \simeq \frac{(GD^2)_d \times n_m}{375\ (T_{st} - T)} \qquad (٦ - ٢٤)$$

وبفرض أن التعجيل يتم بمعدل منتظم ، فاننا نستطيع أن نحصل على الزمن $t_{st\ 12}$ اللازم لارتفاع السرعة من n_1 إلى n_2 على نمط المعادلة (٢٤ – ٦)، حيث :

$$t_{st\ 12} = \frac{(GD^2)_{d'} \times (n_2 - n_1)}{375\ (T_{st} - T_1)} \qquad (٦ - ٢٥)$$

وعندما يكون بدء المحـرك بدون حمل ، ويكون عزم الدوران الذى يبذله فى خلال فترة البدء يساوى عزم دوران الحمل الكامل، الذى يستهلك المحرك على أساسه مقنن قدرته P_m كيلووات، فان الزمـن الذى يستغرقه فى البدء هو عبارة عن ثابت الزمن الميكانيكى (mechanical time constant) للمحرك، الذى استنبطت على أساسه المعادلة (١٧ – ٢) المشار اليها آنفا ، حيث نجد أن:

$$\theta_m \simeq \frac{(GD^2)_m}{36.5} \times \left(\frac{n_{mo}}{100}\right)^2 \times \frac{1}{P_m} \qquad (٦ - ٢٥)$$

مثال محلول (٤) :

The carrying capacity of a certain crane is 30 tons, and its own weight is 39 tons. It is driven by an electric motor with 26 KW rated power, which imparts steadily a speed of 100 m/min to the weight carried by the crane, when it rotates with full load at a speed of 700 r.p.m. Find the starting time of the whole drive, if the motor is started with double the full load torque, and its armature has a fly wheel moment of 12 Kg.m², What is the least distance, through which the load

should be moved , in the starting period , before it attains the given steady speed .

سوف يتحرك الوزن (W = 30 + 39) ٦٩ كيلو جرام (وزن الثقل المحمول بالونش مضافا إليه الوزن الذاتى للونش) ، بعد انتهاء فترة البدء ، بسرعة ثابته v مقدارها ١٠٠ متر فى الدقيقة ، فيكون عزم الحدافة المناظرة ، منسوبا إلى عمود إدارة المحرك ، باستخدام الشطر الثانى للمعادلة (٢٢ – ٦) :

$$\frac{\left(GD^2\right)_l}{\varepsilon_l^{\,2}} = 365 \quad \frac{Wv^2}{n^2_m} = 365 \quad \frac{69000\left(\frac{100}{60}\right)^2}{(700)^2}$$

$$= 142.5 \text{ Kg.m}^2$$

باستخدام المعادلة (٢٢ — ٦) ، مع قيمه k عبارة عن ١ر١ ، نحصل على عزم الحدافة الكلى لوسيلة التحريك منسوبا إلي عمود إدارة المحرك ، حيث :

$$\left(GD^2\right)_d = 1.1 \times 12 + 142.5 = 155.6 \quad \text{Kg.m}^2$$

نحصل على عزم دوران المحرك T_m المناظر لمقنن قدرته $P_m = 26$ KW حيث

$$T_m = \frac{975 \; P_m}{n_m} = \frac{975 \times 26}{700} = 36.25 \text{ Kg.m} .$$

ونظرا لأنه منصوص على أن المحرك يبذل ضعف عزم دورانه المقنن فى خلال فترة البدء ، فاننا نستطيع الحصول على قيمة زمن البدء t_{st} من المعادلة (٢٤ – ٦) باستخدام $2\ T_m$ مكافئا لعزم دوران البدء فى المحرك T_{st} . ويكون عزم دوران الحمل المضاد T_l مساويا لعزم الدوران المقنن للمحرك T_m ، بحيث يصبح $(T_{st} - T_l)$ مساويا T_m فى النهاية .

$$T_{st} = \frac{(GD^2)_d \times n_m}{375\ T_m} = \frac{155.6 \times 700}{375 \times 36.25} = 8.02 \quad secs$$

أى أن المحرك يستغرق من الوقت ٨٫٠٢ ثانية ، فى فترة بدئه، حتى يصبح دائرا بسرعة ٧٠٠ لفة في الدقيقة ، وهو يأخذ الحمل الكامل البالغ ٢٦ كيلووات من الينبوع ، ويبذل عزم دوران مقداره ٣٦٫٢٥ كيلوجرام . متر لتحريك الثقل المعلق فى الونش، بسرعة ثابتة مقدارها ١٠٠ متر فى الدقيقة . ومن الواضح أن الثقل يبدأ حركته من الصفر ، ويتحرك بعجلة منتظمة ، كما سبقت الإشارة اليه فى المعادلة (١٩ ــ ٦) فيكون متوسط سرعته فى خلال فترة البدء نصف السرعة النهائية ، اى ٥٠ متر/الدقيقة، مما يجعله يقطع مسافة مقدارها $\left(8.02 \times \frac{50}{60} \simeq 7\ ,\ 6\right)$ ٦٫٧ متر فى هذه الفترة . وهذا يعنى أن الونش لن يتمكن من تحريك الثقل بالسرعة المعطاة وهى ١٠٠متر/الدقيقة، الا اذا زادت مسافة التحريك عن ٦٫٧ متر .

تعتبر الطريقة السابقة للحصول على زمن البدء تقريبية في الواقع ، وهى تعتمد أساسا على افتراض أن عزم الدوران الذى يبذله المحرك T_{st} ، فى خلال فترة البدء ، ثابت القيمة ، وهى عبارة عن نسبة معينة من عزم دوران الحمل الكامل (الضعف فى المثال السابق) ، كما أن عزم دوران الحمل هو الآخر ثابت القيمة (يساوي عزم دوران الحمل الكامل فى المثال السابق) ، بحيث يصبح عزم الدوران المعجل للكتل الدائرة على عمود الإدارة ذا قيمة ثابتة هى الفرق بين الاثنين $T_{st} - T_l$. وهذا يؤدى الى حدوث تعجيل ثابت ، وتغير منتظم فى السرعة ، مما يمكننا من وضع $\frac{n}{t}$ بدلا من $\frac{dn}{dt}$ فى المعادلة (٢٤ ــ ٦) ، ثم استخدامها للحصول على زمن البدء t_{st} . أما فى حقيقة الأمر فان المحرك يمتلك عادة منحنى معروف لعزم الدوران مع السرعة، ويختلف مجراه على حسب وجود اضافات (مقاومات فى أغلب الأحيان) ، أو تعديلات في احدى دوائره الكهربية ، ولا يكون عزم الدوران ثابت القيمة مع السرعة

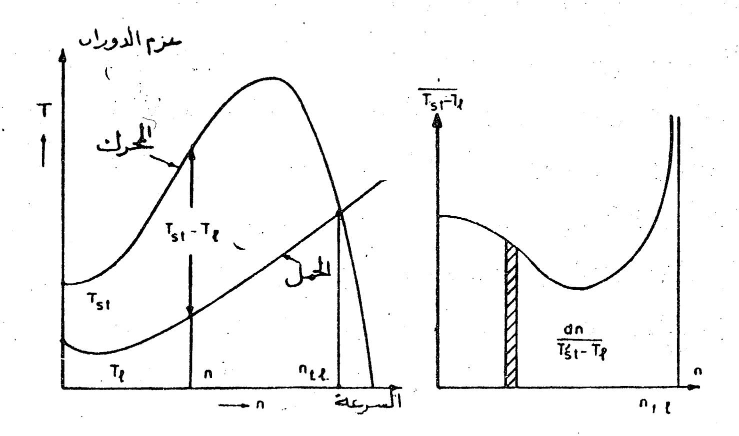
الا فى حالات قليلة ، بل ان الأمر قد يتطور الى حد عدم امكان تحديد علاقة رياضية تربط بين عزم الدوران والسرعة ، مما قد يساعد على تبسيط الأمور . والمثل واضح على ذلك بالنسبة للمحرك التأثيرى ، الذى هو من أوسع المحركات انتشارا فى مجال التحريك الكهربى ، وسوف نرى أن المعادلة الرياضية التى تربط بين عزم دورانه وسرعته ليست سهلة التناول ، اذا أردنا توخى الدقة فى الحصول على زمن البدء ، باستخدام المعادلة الأساسية دون اللجوء الى الطرق المبسطة والتقريب . اجمالا لما سبق فاننا نستطيع أن نحصل على زمن البدء باحدى الطريقتين الآتيتين :

١ — استخدام المعادلة (٢٤ — ٦) دون اللجوء الى افتراضات لتسهيل الأمور ، وفى هذه الحالة نجد أن :

$$t_{st} = \int_{0}^{n_m} \frac{(GD^2)_d \ dn}{375\ (T_{st} - T_l\ )} \qquad (٦ - ٢٦)$$

وسوف يكون من الضرورى حينئذ وجود علاقـة رياضية للمقدار $(T_{st} - T_l)$ كدالة للسرعة n ، بحيث يمكن إجراء التكامل الوارد فى المعادلة (٢٦ — ٦) ، والحصول على القيمة المطلوبة لزمن البدء t_{st} . وإلا فاننا نضطر فى معظم الأحيان الى استخدام الطريقة البيانية للحصول على قيمة التكامل ، وذلك بايجاد المساحة تحت المنحنى الذى يعطى $\frac{1}{(T_{st} - T_l)}$ كدالة للسرعة n ، كما هو مبين فى شكل (٨ — ٦) لحالة محرك تأثيرى مع مروحة . وهذا بطبيعة الحال يستدعى معرفة مجرى كل من المنحنين T_{st} كدالة للسرعة n ، T_l كدالة لنفس السرعة .

٢ — استخدام الطريقة المبينة سابقا ، والتى استخدمت لحل المثال ٤ ، ونحتاج فى هذه الحالة الى افتراض قيمتين متوسطتين ثابتتين ، تحل احداها



(شكل ٨ – ٦)

(وهى T_{st}) محل عزم دوران المحرك المتغير في خلال فترة البدء ، ويكافىء فعلها فعله ، وتحل الثانية (وهى T_l) محل عزم دوران الحمل المضاد ، وتؤدى ما يناظر عمله . وقد يمكن الاتفاق عموما على القيمتين T_l , T_{st} ، بالنسبة لانواع معينة من المحركات والأحمال ، وذلك بدلالة بعض القيم المحددة والمعروفة على المنحنيات الفعلية الخاصة بكل منها . فبالنسبة لمحركات التيار المستمر يتأرجح عزم الدوران في خلال فترة البدء بين قيمتين ، احداهما صغرى T_{min} ، والأخرى قصوى T_{max} ، وذلك تبعا لتغير تيار البدء (عند اخراج قطاعات من مقاومة البدء) ، ويمكننا على هذا الأساس اعتبار أن $T_{st} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$. وبالنسبة للمحركات التأثيرية يمكننا أن نعتبر أن $T_{st} = \frac{T_{max} + T_s}{2}$ ، حيث T_s هو عزم دوان المحرك لحظة البدء ، T_{max} هى قيمة النهاية العظمى لعزم الدوران ، كما سبق بيانه بالنسبة لشكل (٤ – ١) .

عندما تحتوى وسيلة التحريك على أجزاء دوارة ، وأجزاء تتحرك حركة خطية، كما هو الحال بالنسبة لآلات الرفع كالاوناش مثلا ، فانه يمكن

حساب عزم الحدافة الكلى منسوبا الى عمود ادارة المحرك من المعـــادلة (٢٢ ــــ ٦) بدلالة كل من الثقل المرفوع W وسرعته المنتظمة v . وقـد استطعنا الحصول على عزم الحدافة المكافىء للثقل بمساواة الشد فى الحبل S الذى يرفع الثقل بالوزن W ، باعتبار أن الحركة منتظمة . لذلك تجب مراعاة أنه عندما يكون الثقل متحركا بعجلة منتظمة a ، أى بسرعة متغيرة تغيرا منتظما ، فان الشد S يحل محل W فى المعادلتين (١٧ - ٦) ، (٢٢ - ٦) .

ويمكننا الحصول على قيمة الشد S بدلالة العجلة المنتظمة a وعجلة الجاذبية الأرضية والوزن W ، على حسب ما اذا كان الثقل متحركا الى أعلى أو الى أسفل ، من معادلة الحركة على النحو التالى :

ا) الحركة الى أعلى :

$$S = W + \frac{W}{g} a = W \left(1 + \frac{a}{g} \right) \; Kg \qquad (٢٧ — ٦)ا$$

ب) الحركة الى أسفل :

$$S = W - \frac{W}{g} a = W \left(1 - \frac{a}{g} \right) \; Kg \qquad (٢٧ — ٦) ب$$

لذلك فانه عندماتكون سرعة الحركة الخطية v متغيرة ، فان عزم دوران الحدافة المكافىء للثقل W ، الذى يجب أن يحـل محل الحد $\frac{Wv^2}{n^2_m}$ فى المعادلة (٢٢ ــ ٦) ، عبارة عن

$$\left(GD^2 \right)_l = 365 \; \frac{Sv^2}{n^2_m} \qquad (٢٧ - ٦) ب$$

حيث تعوض قيمة S من المعادلة (٢٧ ــ ٦) ا ، وتتوقف قيمة v على قيمة العجلة الخطية a

مثال محلول (٥) :

a 3 - phase 4 - pole induction motor is rated 10 KW on a 50 HZ supply , and rotates at full load With a speed of 1450 r.p.m. , when Contained in a drive having a flywheel moment referred to the motor shaft of 10 Kg.m.^{2} The motor has a ratio rotor phase esistance to stand still reactance of 0.13 and a short circuit current 5times the full load current . The load on the motor Consists mainly of a load weighing 20 tons, which has to be raised from rest With a velocity not exceeding 1.2 m/sec . If the motor starts on load and is fully loaded at the end of the starting period, find the time taken by the motor to attain its full speed and the Corresponding distance moved by the weight. Comment your result.

تصل سرعة الثقل المرفوع فى نهاية فترة البدء للمحرك t_{st} الى اكبر قيمة لها ، وهى ٢ر١ متر / الثانية فى هـذه الحالة ، وذلك بتعجيل منتظم . فاذا كانت h هى المسافة بالامتار التى يرتفع فيها الثقل فى أثناء فترة البدء ، فان $t_{st} = \frac{2h}{v_m}$ ، حيث v_m هى السرعة القصوى ، كما سبق بيانه. تكون قيمة التعجيل المنتظم a متر/الثانية^2 فى هذه الحالة عبارة عن

$$a = \frac{v_m^2}{2h} = \frac{v_m}{t_{st}} \qquad (٢٧ - ٦)$$

عزم دوران الحمل الكامل للمحرك :

$$T_{fl} = \frac{975 \times 10}{1460} = 6.68 \quad Kg.m.$$

نحصل على معامل الإنزلاق S_m عند قيمة النهاية العظمى لعزم الدوران T_{max} من المعادلة

$$S_m = \frac{R_2}{X_{20}} = 0.13 = \alpha$$

نحصل على معامل الإنزلاق S_{f1} عند عزم دوران الحمل الكامل T_{f1} من المعادلة

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1500 - 1450}{1500} = 0.0333$$

$$\left[n_s = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{ r.p.m.} \right]$$

نحصل على T_{max} قيمة النهاية العظمى لعزم الدوران من المعادلة

$$T_{max} = T_{f1} \frac{S^2_{f1} + \alpha^2}{2S_{f1} \alpha} = 6.68 \frac{11.1 \times 10^{-4} + 169 \times 10^{-4}}{86.5 \times 10^{-4}}$$

$$= 14.3 \text{ Kg.m.}$$

نحصل على T_s عزم دوران البدء من المعادلة:

$$T_s = \left(\frac{I_{sc}}{I_{f1}}\right)^2 S_{f1} \times T_{f1} = 25 \times 0.0333 \times 6.68$$

$$= 5.725 \text{ Kg.m.}$$

و بذلك يمكننا أن نعتبر قيمة ثابتة مكافئة لعزم الدوران فى خلال فترة البدء T_{st} ، كما سبقت الاشارة اليه ، على النحو الآتى :

$$T_{st} = \frac{T_{max} + T_s}{2} = \frac{14.3 + 5.725}{2} \simeq 10 \text{ Kg.m.}$$

باستخدام المعادلة (٢٢ ـ ٦) نحصل على عزم دوران الحدافة لوسيلة النقل

بأ كلها [$(GD^2)_d$] منسوبا إلى عمود ادارة المحرك (باعتبار أن $v = v_m$ وأن $(k = 1.2)$

$$(GD^2)_d = 1.2 \times 10 + 365 \times \frac{20000 \times (0.2)^2}{(1450)^2}$$

$$= 12 + 5 = 17 \ Kg.m^2$$

عندما يصبح المحرك محملا بالحمل الكامل عند نهاية فترة البدء ، كما هو منصوص عليه فى المسألة ، فمعنى هذا أن عزم دوران الحمل المضاد T_l يساوى عزم دوران المحرك نفسه عند الحمل الكامل T_{fl}، أى يساوى ٦٫٦٨ كيلوجرام متر . باستخدام المعادلة (٢٤ ــ ٦) نحصل على زمن البدء t_{st} :

$$t_{st} = \frac{17 \times 1450}{375 \times (10 - 6.68)} = \frac{17 \times 1450}{375 \times 3.32} = 20.4 \ sec$$

نحصل على المسافة التى يتحركها الثقل فى خلال فترة البدء من من المعادلة (٢٧ ــ ٦)

$$h = \frac{v_m \ t_{st}}{2} = \frac{1.2 \times 20.4}{2} = 12.24 \ m$$

وهذا يعنى أن الثقل لن يبدأ فى التحرك حركة منتظمة بقيمة النهاية العظمى للسرعة المعطاة وهى ١٫٢ متر / الثانية ، الا اذا زادت مسافة التحريك عن ١٢٫٢٤ متر . أى أن الثقل يظل فى حالة تعجيل طوال رفعه مسافة ١٢٫٢٤ متر / الثانية ، منذ بدء الحركة .

(٨ ــ ٦) حساب زمن الفرملة لوسيلة التحريك الكهربى :

(Calculation of the time of braking for an electric drive)

يصبح الحصول على زمن البدء ، وكذلك زمن الفرملة الذى سنناقشه فى

هذا البند، ضرورة تحتمها الاعتبارات الاقتصادية (economical considerations) بالنسبة لبعض وسائل التحريك ، التى تكـون جـزءا أساسيا (an essential part of) من مؤسسة صناعية كبيرة (a big industrial foundation) تتطلب العمليات الانتاجية الأساسية فيها (basic production proccsses) عكس اتجاه دوران وسائل التحريك بصورة منتظمة (in a regular manner) عدداً معيناً من المرات فى زمن محدد ، أى بتردد محسوب (with a predetermined frequency) . ومن البديهى أن زمن البدء وزمن الفرملة لوسيلة التحريك سوف يؤثران معاً على الطاقة الانتاجية (production unit) ، التى تمثل هذه الوسيلة جزءا منها ، حيث يمكن اعتبار كل من فترتى البدء والفرملة من معوقات الانتاج في هذه الحالة ، بما تمثلانه من زمن مفقود ، يتسبب فى خفض معـدلات الانتـاج (production rate) للوحدة المعنية . وإن التعرض لتأثير كل من فترتى البدء والفرملة على الاعتبارات الاقتصادية ، التى يجب أخذها فى الحسبان ، عند انشاء مثل هذه المؤسسات ، يعتبر خارجاً عن نطاق بحث هذا المؤلف ، ولـكننا نريد أن نلفت النظر فقط الى ضرورة مراعاة ذلك ، مع استنباط ومناقشة العلاقات التى تحدد كل من زمنى البدء والفرملة ، والاشارة الى بعض الاعتبارات المفيدة فى هذا الاتجاه . فيمكن على سبيل المثال أن نستنبط ، بالرجوع الى المعادلة (٢٦ ـ ٦) ، وأشباهها ، أنه يمـكن اختصار زمن البدء لوسيلة التحريك بزيادة عزم دوران البدء، مما يستلزم زيادة قدرة محرك الوسيلة بطبيعة الحال . ولـكننا لا نستطيع التكهن بتأثير ذلك على اقتصاديات وحدة الانتاج التى تعمل فيها الوسيلة ، الا إذا توفرت المعلومات الكاملة ، التى تمكننا من الموازنه الدقيقة بين تأثير الزيادة في ثمن المحرك الجديد الذى نحتاج اليه في هذه الحالة، وتأثير الـكسب فى الوقت الذى ينشأ عن اختصار زمن فترة البدء على معدلات الانتاج ، وبالتالى على تكاليف انتاج الوحدة من السلعة المنتجة، التى تتخذ عموما أساسا لكل حساب . ولا يسعنا الاستكمال هذا الموضوع ، إلا أن نبين فيما يلي طريقة حساب زمن الفرملة في وسيلة التحريك الكهربي.

إن زمن الفرملة t_{br} ، شأنه فى ذلك شأن زمن البدء تماما ، يتوقف على كل من عـــزم الحدافة الكلى لوسيلة التحريك، منسوبا إلى عمود إدارة المحرك $(GD^2)_d$ ، الذى يمكن الحصول عليه بنفس الطريقة التى اتبعت فى حساب زمن البدء ، ثم عزم دوران الفرملة T_{br} ، الذى يتسبب فى تقصير الحركة فى خلال فترة الايقاف ، مما يجعلنا نستطيع حساب زمن الفرملة (time of braking)، على نفس المنوال الذى اتبعناه فى حساب زمن البدء، وذلك بمحاكاة المعادلة (٢٦ — ٦) ، فنجد أن :

$$t_{br} = \int_{n_m}^{0} \frac{(GD^2)_d \, dn}{375 \; T_{br}} \qquad (٢٨ — ٦)$$

وفى هذه الحالة لابد من الحصول على T_{br} كدالة السرعة ، فى أثناء فترة الفرملة ، كما كان الأمر بالنسبة للمعادلة (٢٦ — ٦) عند حساب زمن البدء بها ، ونشير فى هذا الصدد إلى مانشره المؤلف من دراسات فى موضوعى بدء وفرملة المحرك التأثيرى ثلاثى المراحل ، كما هو مبين فى قائمة المراجع فى نهاية الكتاب . هـــذا وإذا أمكن الحصول على قيمة مكافئة وثابتة لعزم الدوران الفرملى t_{br} ، واعتبار التقصير منتظما تحت تأثير هذا العزم فى خلال فترة الفرمــلة ، يمكن الحصول على زمن الفرمــلة t_{br} بمحاكاة المعــادلة (٢٤ - ٦) فنجد أن :

$$t_{br} = \frac{(GD^2)_d \times n_m}{375 \; T_{br}} \qquad (٢٩ — ٦)$$

قد يستخدم عزم دوران الحمل المضاد للمساعدة فى فرملة المحرك ، وفى هذه الحالة يحتوى عزم الدوران الفرملى T_{br} ، علاوة على عزم دوران التقصير الناشىء عن عزم الحدافة المكافىء للكتل الدائرة ، منسوبا الى عمود ادارة المحرك ، على عزم دوران الحمل T_l ، ويمكن أن نحتاج لهذا الغرض الى استخدام المعادلة (٢٢ - ٦)

لايجاد عزم الدوران الفرملى بدلالة عزم دوران الحدافة الكلى للكتل الدائرة والحمل معا منسوبا الى عمود ادارة المحرك . هـذا وسوف نخصص فيما بعد بعض البنود لدراسة الفرملة بالطرق الكهربية (Electric Braking)

البدء بعزم دوران متناقص خطيا مع الزمن (Starting wih a linear decreasing Starting torque) تشترك المحركات التى تمتلك خاصية التوازى (Shunt Characteristics) ، مثل محرك التوازى للتيار المستمر ، والمحرك التأثيرى ثلاثى المراحل ، عند وجود مقاومه كبيرة فى دائرة العضو الدائر ، بأن عزم البدء [illegible] عند البدء [illegible] كبير ، [illegible] يتناقص خطيا حتى يصل المحرك الى سرعة الدوران المعتاده . فاذا كان البدء بدون حمل ، فان عزم الدوران المضاد يكون مقتصر على عزم دوران التقصير الناشيء عن عزم القصور الذاتى للكتل الدائرة على محور ادارة المحرك ، وفي هذه الحالة تزداد السرعة على منحنى أسى (exponential curve) تماما كما يحدث بالنسبة لنمو التيار الكهربى فى دائرة حثية ، فتكون العلاقة بين السرعة n عند أية لحظة t بعد البدء ، وسرعة المحرك المعتادة بدون حمل n_0 على هذا المنوال هى :

$$n = n_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta_s}} \right) \qquad (٦-٣٠)$$

حيث

$$\theta_s = \frac{GD^2 \; n_0}{375 \; T_s} \qquad (٦-٣١)$$

. يكون θ_s ، فى هذه الحالة ، هي الزمن الذى تصل فيه السرعة إلى قيمتها n_0 . لو استمر عزم دوران البدء عند القيمة T_s بدون تناقص وقياسا على نمو التيار فى الدائرة الحثية ، التى شبهنا بها تزايد السرعة ، فان θ_s تناظر ثابت الزمن ، ويمكن أن نطلق عليها ثابت زمن البدء للمحرك انظر صفحة ١١٩ من كتاب هندسة الآلات الكهربية للمؤلف (starting time constant) . هذا وتصل سرعة المحرك ، مع تناقص عزم الدوران البدء خطيا كما هى الحال ، فعلا إلى ٦٣٫٦ فى المائة من سرعة اللاحمل n_0 بعد مرور زمن مقداره θ_s . وبتعويض T_{fl} ، عزم دوران المحرك الذى يبذله عند الحمل الكامل ،

فى المعادلة (٣١ — ٦) نحصل على ثابت الزمن الميكانيكى θ_m للمحرك ، كما سبق لنا تعريفه ، (صفحة ٢٦٨ من كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية للمؤلف) ، حيث :

$$\theta_m = \frac{GD^2}{375} \frac{n_0}{T_{fl}} \qquad (٦-٣٢)$$

(٩ – ٦) الفرملة بالوسائل الكهربية : (Electric Braking).

إلى جانب حاجتنا إلى الفرملة لايقاف الكتل المتحركة (دائريا أو خطيا) ، فقد نحتاج إليها أيضا للحد من السرعة فى حالة الأجسام التى تتحرك هابطة على منحدر ، أو تهوى تحت تأثير الجاذبية ، حيث تمتلك على حسب موقعها الابتدائى (Initial Position) كميات كبيرة من طاقة الجهد (Potential Energy) بحكم تأثير الجاذبية الأرضية عليها ، التى يمكن أن تتحول إلى طاقة حركة (Kinetic Energy) وتكسبها سرعات هائلة . وقد يلزم فى هذه الحالة بذل عزم دوران كبير ولفترات طويلة ، للتأثير على الكتل المتحركة بعجلة تقصير ، (retardation) لمنع زيادة سرعتها بعد الحد المنشود. ويمكن الحصول على عزم دوران التقصير هذا باستخدام وسائل الفرملة الميكانيكية (mechanical braking) أو وسائل الفرملة الكهربية (Electric braking) . وتمتاز الوسائل الكهربية عن قرينتها الميكانيكية بما يأتى : ١ – تحتاج الوسائل الكهربية الى جهود وتكاليف أقل كثيرا للعناية بالأجهزة المستخدمة وصيانتها ، ٢ – النظافة التامة المستحبة لعدم وجود مخلفات نتيجة لتآكل بعض الأجزاء بفعل الإحتكاك الشديد اللازم فى حالة الفرملة الميكانيكية ، ٣ – يمكن السيطرة بطريقة أفضل على كميات الحرارة ، المتخلفة عن عملية تحول طاقة الحركة الكبيرة أثناء الفرملة بالوسائل الكهربية ، وذلك عن طريق تنظيم وسائل تبديدها ، بعد حصرها فى أماكن مناسبة ، باستخدام المقاومات المجهزة خصيصا لهذا الغرض . كما يمكن فى معظم الحالات تجهيز الوسائل اللازمة

لإعادة تحويل جزء كبير من طاقة الحركة المراد تبديدها فى أثناء عملية الفرملة، وتغذيته مرتجعا (fed back) الى ينبوع القدرة ، ويطلق على هذه الطريقة اسم الفرملة بالتوليد المرتجع (Regenerative Braking) ٤ - يمكن الحصول على عجلة تقصير أصغر كثيرا فى حالة الفرملة الكهربية ، بحيث يتم الايقاف بتدرج غاية فى النعومة ، لا تحدث فيه عملية الرج ، التى تضايق الاشخاص ، وهى من أهم خصائص الفرملة الميكانيكية .

ولكننا مع ذلك نلاحظ أن الفرملة الكهربية لاتستطيع فى الغالب أن تهىء لنا عزم دوران امساك (Hloding torque) ، ولا بد أن نلجأ فى معظم الأحيان الى الاستعانة بفرامل الامساك الميكانيكية (Mechanicl holding brakes) مع الحصول على عزم دوران التقصير كهروديناميكيا (electaodynamically) . كذلك يجب عمل دراسة مقارنة من الناحية الإقتصادية عند الموازنة بين كل من وسيلتى الفرملة ، بغرض استخدامها فى مشروع معين ، لأن وسائل الفرملة الكهربية قد تحتاج الى انفاق زائد بسبب الأجهزة الإضافية المطلوبة لها ، كما أن مقنن قدرة المحرك قد لاتصبح كافية عندما يعمل كمولد لاتمام الفرملة بالتوليد المرتجع .

يمكن أن تتم الفرملة كهربيا بالاستعانة بالمحرك الكهربى المستخدم فى وسيلة التحريك ، بعد عمل التعديلات اللازمة فى توصيلاته ، كما يمكن أن تتم باستخدام فرملة تيارات اعصارية (Eddy - current brake) منفصلة. وسوف نقتصر فى هذه الدراسة على الطريقة الأولى ، حيث توجد أنواع من الفرملة ، التى يمكن أن تستخدم جميعها مع كل أنواع المحركات شائعة الإستعمال ، وهى :

١ - الفرملة بالتوليد المرتجع (Regenerative Braking) و ٢ - الفرملة ديناميكيا أو باستخدام المقاومة Dynamic or rheostatic braking

و ـ الفرمـلة بالتيار المعكوس أو التبديل (Plugging or reverse - current braking) .

فى حالة الفرملة بالتوليد المرتجع يتم تشغيل المحرك كمولد ، مع استمرار اتصاله بالينبوع ، فيقوم بتحويل طاقة الحركة ، الكامنة فى الكتل الدائرة على عمود الإدارة ، إلى طاقة كهربية ويغذيها بصورة مرتجعة إلى الينبوع . ولا تحتاج عملية الفرملة بالتوليد المرتجع ، فى معظم الاحوال ، إلى اجراء عمليات مفتاحية (Switching operations) خاصة ، مالم نكن فى حاجة إلى تغيير السرعة عند بدء الفرملة . ونلفت الانتباه ، فى هذا الصدد ، إلى أن معظم الآلات الكهربية تمر بنعومة تامة (quite smoothly) من حالة التحريك (motoring) إلى حالة التوليد (generating) اذا ما سيطر على حركتها عزم دوران الحمـل (over driven by the load) .

وعند استخدام الفرملة الديناميكية يتم أيضا تشغيل المحرك كمولد ، ولكنه بدلا من ارجاع الطاقة التى يولدها يبددها فى هذه الحالة ، على شكل حرارة فى مقاومات ، قد تكون معدة ومجهزة لهـذا الغرض ، كما يمكن استخدام ملفات الآلة أو المقاومات المتصلة بها ، اذا أمكن تهيئتها من الأصل لأداء هذه المهمة الجانبية أيضا .

أما فى حالة الفرملة بالتيار المعكوس أو التبديل ، فان المحرك ، بعد فصله من الينبوع مباشرة ، يعاد توصيله اليه فى التو ، مجهزا بحيث يحاول الدوران فى الاتجاه المضاد لاتجاه دورانه أثناء التحريك ، فيعمل على ايقاف الحمـل . واذا لم يفصل المحرك من الينبوع فى اللحظة المناسبة ، بعد اعادة توصيله للفرملة ، فسوف يقوم بتحريك الحمل فى هذا الاتجاه المضاد . فاذا لم يكن ذلك مطلوبا ، فمن الضرورى تهيئة المتمم المناسب (suitable relay) ، الذى يقوم بتشغيل قاطع الدائرة ، لحظة وقوف المحرك ، لفصله عن الينبوع . ويلاحظ أننا نحتاج فى هـذا النوع من الفرملة الى وسائل خاصة لتبديد كل من الطاقة الكهربية

المأخوذة من الينبوع ، لاتمام الفرملة ، وكذلك الطاقة الميكانيكية الكامنة أصلا فى الكتل المتحركة ، علاوة على الخسارة فى كفاءة تحويل الطاقة الناشئة عن هذا التبديد .

سنتناول فيما يأتى بالشرح المختصر كيفية تطبيق وسائل الفرملة السابقة على بعض أنواع المحركات شائعة الاستخدام فى وسائل التحريك الكهربى .

(١٠ — ٦) الفرملة بالتوليد المرتجع :

يمكن تهيئة المحرك للعمل كمولد على الينبوع الذى كان يغذيه عن طريق رفع قيمة القوة الدافعة الكهربية المتولدة فى ملفات المنتج، بحيث تصبح أكبر من ضغط الينبوع (هندسة الآلات الكهربية صفحة ٢٨٢) . ويمكن تنفيذ ذلك فى حالة المحركات التى يتم التحكم فى سرعتها عن طريق خفض ضغط التشغيل ، حتى يصبح اقل من القوة الدافعة الكهربية للمحرك ، كما يحدث مع مجموعة وارد ليونارد حيث يمكن خفض ضغط المولد الذى يغذى المحرك عن طريق خفض قيمة تيار التنبيه فى المولد ، كما يمكن ايضا الوصول الى نفس الغرض برفع قيمة القوة الدافعة الكهربية للمحرك عن طريق رفع قيمة تيار التنبيه فيه . أما فى حالة محركات التوازى ، أو ذات التنبيه المستقل ، التى تتغذى من ينبوع ذى ضغط ثابت ، فان الحل الوحيد يكون فى رفع قيمة القوة الدافعة الكهربية للمحرك عن طريق زيادة قيمة تيار التنبيه فيه . كذلك يمكن الحصول على نفس النتيجة اذا أمكن جعل الحمل يدفع المحرك (overhauls the motor) فى نفس اتجاه دورانه (كما يحدث عند هبوط مركبة كهربائية منحدرا ، حيث تقوم مركبة الثقل بعملية الدفع)، بحيث تتعدى سرعته حدها الذى تبلغه فى حالة اللاحمل . وعندما يكون تيار التنبيه معلوما فانه يمكن حساب قيمة عزم دوران المحرك عند أية سرعة ، أو على العكس يمكن الحصول على قيمة تيار المنتج أو قيمة القوة الدافعة الكهربية ، على حسب الاحوال ، عن طريق حل المعادلات الخاصة بدوائر المحرك (صفحة ٤٨٠ الى صفحة ٤٩٤ من كتاب

هندسة الآلات الكهربية). بالنسبة لمحركات التوالى نجد أننا لانستطيع جعل القوة الدافعة الكهربية المحرك اكبر من ضغط الينبوع ، بأى من الأساليب السابقة ، لأن تيار التنبيه هو نفسه تيار الحمل ، فلا يزيد الا بزيادة الحمل ، كما أن ارتفاع قيمة السرعة لاينشأ الا بانخفاض قيمة التيار ، وهذا ما يؤكد عليه منحنى خواص المحرك . لذلك نضطر ، عند استخدام هذا النوع من الفرملة مع محركات التوالى المستخدمة فى الجر الكهربى ، الى فصل توصيلات المحرك ، ثم جعل تنبيهه مستقلا ، بتغذية ملفات المجال على التوازى مع المنتج من الينبوع ، مع اخذ الاحتياطات اللازمة فى هذه الحال ، كما يتضح عند مراجعة الفرملة فى الجزء الخاص بالجر الكهربى من هذا الكتاب .

مثال محلول (١) :

A D.C. shurt motor is fed from a 220 V supply and when running at 1150 r.p.m, with full excitation, it has an induced e.m.f. of 215 volts. It is coupled to an overhauling load with a torque of 19 Kg.m. . If the armature has a resistance of 0.01 ohm, determine the lowest speed at which the motor can hold the load by regenerative braking.

يشير الدليل 1 فى الحل الآتى الى القيم المختلفة للسرعة ، القوة الدافعة الكهربية ، الخ عندما كان المحرك يدير الحمل ، ويشير الدليل 2 الى القيم المناظرة عندما أصبح الحمل هو الذى يدفع المحرك فى نفس اتجاه الدوران بسرعة تزيد عن سرعته فى حالة اللاحمل ، وذلك لكى يعمل كمولد ، ويمكن أن تتم الفرملة بالتوليد المرتجع . ان أقل سرعة n_2 يمكن أن تصل اليها الآلة ، وهى تعمل كمولد ، تلك التى يصبح عندها عزم الدوران المضاد الناشىء عن تأثير رد فعل المنتج مساويا لعزم دوران الحمل ١٩ كجم متر ، الذى يدفع الآلة فى تلك اللحظة . ويتحدد عزم الدوران هذا بقيمتى القوة الدافعة الكهربية E_2 ، التى تحددها

السرعة المطلوبة n_2 ، وتيار الفرملة I_{a2} ، الذى يغذى القدرة المرتجعة إلى الينبوع ، والذى تتحدد قيمته بقيمة القوة الدافعة الكهربية أيضا . ويكون الحل ، على هذا الأساس على النحو التالى :

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow E_2 = E_1 \frac{n_2}{n_1} \qquad (1)$$

$$T = 0.973 \frac{E_2 \, I_{a2}}{n_2} \rightarrow I_{a2} = \frac{Tn_2}{0.973 \, E_2} = \frac{Tn_1}{0.973 \, E_1} \qquad (2)$$

الآلة تعمل كمولد :

$$E_2 = V + I_{a2} R_a \qquad (3)$$

بالتعويض عن قيمتى E_2 , I_{a2} فى المعادلة (3) من المعادلتين (2) ، (1)

$$E_1 \frac{n_2}{n_1} = V + \left(\frac{Tn_1}{0.973 \, E_1}\right) R_a$$

$$n_2 = \frac{n_1}{E_1} \left[V + \left(\frac{Tn_1}{0.973 \, E_1}\right) R_a \right] \qquad (4)$$

$$= \frac{1150}{215} \left[220 + \frac{19 \times 1150 \times 0.04}{0.973 \times 215} \right]$$

$$= 1200 \text{ r.p.m.}$$

(١١ — ٦) الفرملة ديناميكيا :

يتم توصيل مقاومة على طرفى المنتج ، بدلا من الينبوع ، فى خلال فترة الفرملة ، حيث تعمل الآلة كمولد تديره طاقة الحركة الكامنة فى الكتل الدائرة على عمود الإدارة ، التى اكتسبتها فى خلال فترة التحريك . وتتبدد الطاقة تدريجيا مما يؤدى إلى انخفاض سرعة الآلة ، ولكننا نحاول الاحتفاظ بقيمة ثابتة للتيار المار فى المقاومة ، الذى يعمل على تبديد الطاقة ، وذلك بخفض قيمة المقاومة بدرجة تتناسب مع الخفض المستمر فى السرعة . ويمكن تحقيق

نقص الهدف إذا استطعنا التحكم فى تيار التنبيه ، وذلك بزيادة قيمته لتعويض الخفض المستمر فى السرعة .

ولكن من الجلي أن هذا يمكن أن يتم فى حالتى الآلات ذات التنبيه التوازى والمستقل ، بينما يتعذر فى حالة تنبيه التوالى . وتتحدد قيمة السرعة وعـــزم الدوران فى هذه الحالة أيضا ، كما حدث فى الحالة السابقة بمعرفة تيار المنتج والقوة الدافعة الكهربية :

مثال محلول (٢) :

A 4 – pole D.C. shunt motor is used separately excited for rheostatic braking of its connected load. Assuming that the flux per pole remains constant at 2 megalines during bra king, determine the time for deceleration from 100 to 5 r.p.m. It is assumed that an armature Current of 300 A will be maintained constant during cutting but the external armature circuit resistance gradually . The armature Winding is wave Connected and has a total number of 258 Conductors. The total fly – wheel moment of the drive referred to the motor shaft is 1350 Kgm², and the armature Winding has a resistance of 0.03 ohms

القوة الدافعة الكهربية E المتولدة فى المنتج ، عند أية سرعة n لفـة فى الدقيقة ، فى أثناء الفرملة عبارة عن :

$$E = \frac{2p}{2a} \phi Z \frac{n}{60} \times 10^{-8} = \frac{4}{2} \times 2 \times 10^{6} \times 258$$

$$\times \frac{10^{-8}}{60} n = 0.172\ n \qquad (1)$$

يمكن الإحتفاظ بقيمة التيار عند ٣٠٠ أمبير ، مع انخفاض السرعة فى أثناء

الفرملة ، بتقليل قيمة المقاومة الخارجية ، حتى يتم قصرها عند سرعـة معينة n_{sc} ، حيث تكون قيمة القوة الدافعة الكهربية المتولدة فى المنتج ، على حسب المعادلة (1) عبارة عن $0.172 n_{sc}$ ، وتكون قيمة التيار محددة بـ ٣٠٠ أمبير بمقاومة ملفات المنتج فقط ، لذلك نجد أن :

$$0.172 \ n_{sc} = 300 \times 0.03 \rightarrow n_{sc} = 52.3 \ \text{r.p.m} \qquad (2)$$

إن عزم الدوران T ، بدلالة تيار المنتج I_a ، بالشروط المعطاة ، للآلة عبارة عن :

$$T = 0.973 \ \frac{E \ I_a}{n} = 0.973 \times 0.172 \ I_a$$

$$= 0.1673 \ I_a \qquad \text{Kg.m.} \qquad (3)$$

ونظرا لاحتفاظنا بقيمة I_a ثابتة تصبح قيمة عزم الدوران ثابتة فى خلال هذه الفترة من الفرملة ، وهذا يعنى أن عجلة التقصير الزاوية $\frac{d\omega}{dt}$ تكون ذات قيمة ثابتة فى هذه الفترة أيضا ، مما يمكننا من استعمال معادلة على نمط المعادلة (٢٥ — ٦) للحصول على الزمن t_1 الذى يمضي حتى تنخفض السرعة من ١٠٠ إلى ٥٢٫٣ لفة فى الدقيقة على النحو التالى :

$$t_1 = \frac{(Gd^2)_d \times (n_0 - n_1)}{375 \ T} = \frac{1350 \times (100 - 52.3)}{375 \times 0.1673 \times 300}$$

$$= 3.425 \ \text{sec}$$

عندما تنخفض السرعة عن ٥٢٫٣ لفة فى الدقيقة ، حيث تكون المقاومة الخارجية قد قصرت ، ولم يبق فى دائرة المنتج سوى مقاومة ملفاته ، التى تظل ثابتة القيمة ، تأخذ قيمة القوة الدافعـة الكهربية المتولدة فى ملفات المنتج فى الانخفاض ، متناسبة مع قيمة السرعة المتناقصة ، وتربط بين القيمتين المعادلة رقم (١) . وتتناقص قيمة التيار أيضا متناسبة مع السرعة حيث :

$$I_{asc} = \frac{E}{R_a} = \frac{0.172\ n}{0.03} = 5.73\ n \quad \text{Amps} \qquad (4)$$

وتصبح قيمة عزم الدوران T_{sc} فيهذه المرحلة ، بالتعويض في المعادلة (3)

$$T_{sc} = 0.1673 \times 5.73\ n = 0.96\ n \quad \text{Kg.m.} \qquad (5)$$

بعد أن حصلنا على عزم الدوران كدالة للسرعة n نستطيع حساب زمن الفرملة t_2 ابتداء من السرعة ٥٢٫٣ إلى السرعة ٥ لفـة في الدقيقة ، باستخدام المعادلة (٢٦ — ٦) ، فنجد أن :

$$t_2 = \int_{n=52.3}^{n=5} \frac{1350 \times -d\ n}{375 \times 0.96\ n}$$

$$= -\frac{1350}{0.96 \times 375} \left[\log_e (5) - \log_e (52.3) \right]$$

$$= \frac{1350 \times 2.303}{0.96 \times 375} \left[\log_{10} (10.46) \right] \simeq 8.7 \text{ secs.}$$

يلاحظ أننا استخدمنا dn- بدلا من dn في المعادلة (٢٦ — ٦) ، التي استنبطت على أساس التعجيل ، مما يستوجب تغيير الاشارة في حالة الفرملة ، أي التقصير . كما يلاحظ أن زمن الفرملة في المرحـلة الأولى ، عند الاحتفاظ بقيمة التيار I_a ثابتة ، يقل كثيرا عن زمن الفرملة في المرحـــلة الثانية ، عندما كان التيار يتناقص متناسبا مع السرعة ، وهذا ناشيء بطبيعة الحال عن زيادة قيمة عزم الدوران الفرملي ، الثابت في الحالة الأولى ، كثيرا عن متوسط قيمته المتناقصة في الحالة الثانية . هذا وتجدر الاشارة إلى أن تغيير المقاومة في الحالة الأولى ، للحصول على زمن الفرملة الصغير ، يحتاج إلى مجموعة تحكم بتغذية رجعيـة (feed - back control system) ، وهو أمر يعتبر انجـازه غاية في الصعوبة من الناحية التكنولوجية البحتة ، كما أنه غـير مستساغ من

الناحية الإقتصادية ، إذا قورنت المزايا التى يوفرها بالنفقات الباهظة التى يتكلفها .

زمن الفرملة الكلي : $t_1 + t_2 = 3.425 + 8.7 = 12.125 secs.$

يضاف إلى ذلك بطبيعة الحال الزمن الذى يمضي من لحظة وصول المحرك إلى سرعة ٥ لفة فى الدقيقة حتى يقف تماما ، وهو زمن صغير ، حيث تستخدم فرملة ميكانيكية عادة في تلك المرحلة . هذا ويلاحظ أنه لا يمكن حساب هذا الزمن باستخدام المعادلة (٢٦ — ٦) ، على أساس جعل وسيلة الفرملة الكهربية تستمر فى الإيقاف حتى تصبح $n=o$ ، لأن قيمة التكامل تصبح فى هذه الحالة مالا نهاية .

(١٢ ـ ٦) الفرملة بالتيار المعكوس أو عن طريق التبديل :

عند تبديل توصيل (plugging) طرفى المحرك ، أثناء دورانه ، إلى الينبوع الكهربى ، تصبح القوة الدافعة الكهربية مضافة على التوالى مع ضغط الينبوع ، بعد أن كانت تضاده. وهذا يعنى أن ضعف ضغط الينبوع تقريبا (القوة الدافعة الكهربية تساوى أقل قليلا من ضغط الينبوع) أصبح عاملا على مقاومة دائرة المنتج الصغير لتمرير التيار فيها ، مما قد يؤدى إلى إتلاف ملفات المنتج ، مالم تتخذ الاحتياطات المناسبة ، بتوصيل مقاومة مناسبة علي التوالى في الدائرة ، كما يحدث عند البدء . وإلى جانب جزء الحرارة التى تبددها هذه المقاومة، ويكون مصدره الينبوع ، يوجد جزء آخر ينشأ نتيجة لتحول طاقة الحركة الكامنة فى الكتل الدائرة على عمود إدارة المحرك ، عندما يعمل كمولد نتيجة لعكس اتجاه مرور التيار فيه . وعلى هذا النحو يتولد عزم الدوران الفرملى فى المحرك . ويلاحظ أننا نحتاج ، فى هذا الشأن ، إلى استخدام مقاومة تبلغ قيمتها ضعف قيمة مقاومة البدء المطلوبة ، بالنسبة لمحركات التيار المستمر ، علاوة على الخسارة والمتاعب المادية الناشئة عن كميات الحرارة التى تبددها هذه المقاومة من الينبوع ،

بدون مبرر. لذلك قلما يستخدم هـذا النوع من وسائل الفرملة مع محركات التيار المستمر.

مثال محلول :

The following table gives the data for drawing the magnetisation Curve of a D.C. shunt motor, which has an armature resistance of 0.046 ohm and field winding resistance of 12.6 ohms.

Field Current A	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20
E.M.F. at 1200 r.p.m	50	100	147	180	205	220	232	242

The motor is supplied from 220 V supply and has a fly-wheel moment for the armature and load together of 380 $Kg.m^2$. If reverse-current braking is used, and the armature current is not to exceed 210 A While braking , find the value of the suitable resistance to be used and the time taken for braking the motor speed from 1000 to 500 r.p.m. Find also the values of the energy supplied to the resistance from kinetic enery aud from the supply.

تيار التنبيه فى المجال :

$$I_f = \frac{220}{12.6} = 17.5 \text{ Amps}$$

من المنحنى نجد أن القوة الدافعة الكهربية عند 200 لفة / الدقيقة :

$$E_1 = 232 \text{ Volts}$$

القوة الدافعة الكهربية عند 1000 لفة / الدقيقة مع نفس تيار التنبيه :

$$E_2 = 232 \times \frac{1000}{1200} = 193.3 \text{ V}$$

الضغط الكلى فى الدائرة

$$V_t = 220 + 193.3 = 413.3 \text{ V}$$

حتى لا يتعدى التيار 210 A المقاومة الكلية فى الدائرة :

$$R_t = \frac{413.3}{210} = 1.966 \text{ ohm}$$

المقاومة المناسبة اللازم اضافتها :

$$R_{ad} = 1.966 - 0.046 = 1.92 \text{ ohm}$$

تكون قيمة القوة الدافعة الكهربية E_b فى أثناء الفرملة عند أية سرعة n_b بين ١٠٠٠ و ٥٠٠ لفة / الدقيقة :

$$E_b = 232 \times \frac{n_b}{1200} = 0.1933 \, n_b \, V$$

وتكون قيمة التيار I_b فى الدائرة بناء على ذلك :

$$I_b = \frac{220 + E_b}{R_t} = \frac{220 + 0.1933 \, n_b}{1.966}$$

وهو يمر فى المحرك فى عكس اتجاهه اثناء التحريك :

$$I_b = (111.7 + 0.0984 \, n_b) \, A$$

ويتولد عزم دوران فرملي T_b بسبب اتجاه التيار المعكوس تكون قيمته :

$$\Gamma_b \, (\text{Kg.m.}) = 0.973 \, \frac{E_b \, I_b}{n_b} = 0.973 \times \frac{232}{1200}$$

$$(111.7 + 0.0984 \, n_b)$$

$$T_b = (21 + 0.0185 \, n_b) \quad \text{Kg.m.}$$

باستخدام المعادلة (٢٦ — ٦) نحصل على زمن الفرملة من السرعة ١٠٠٠ إلى ٥٠٠ لفة / الدقيقة ، حيث :

$$t_{ba} = \int_{n_{b1} = 1000}^{n_{b2} = 500} \frac{380 \times - dn_b}{375 \, (21 + 0.0185 \, n_b)}$$

$$t_{br} = \frac{380 \times 2.303}{375 \times 0.0185} \log_{10} \left[\frac{21+0\ 0185\times 1000}{21+0\ 0185 \times 500} \right]$$

$$= 14.7 \quad secs$$

للحصول على مقدار الطاقة التى يعطيها المحرك من طاقة حركته ، فى أثناء الفرملة من ١٠٠٠ إلى ٥٠٠ لفة في الدقيقة ، نلجأ إلى استخدام العلاقـة بين مقدار القدرة P_m للمحرك وعزم دورانه الفرملى T_b ، عند أية لحظة تتحدد بالسرعة ω فى خلال هذه الفترة ، وذلك على النحو التالى :

عزم الدوان الفرملى :

$$T_b = \frac{(GD^2)_d}{4g} \times \frac{-d\,\omega}{dt} = \frac{P_m}{\omega}$$

∴ الطاقة المعطاة بين السرعتين اثناء الفرملة :

$$\therefore \int_{0}^{t_{br}} P_m \; dt = \int_{\omega_{b1}}^{\omega_2} -\frac{(GD^2)_d}{4g} \; \omega \, d\omega$$

$$\omega_{b1} = \frac{2\,\pi \times 1000}{60} = 104.6 \quad rad/sec$$

$$\omega_{b2} = \frac{2\,\pi \times 500}{60} = 52.3 \quad rad/sec$$

ويكون مقدار الطاقة المطلوبة عبارة عن :

$$-\int_{52.3}^{104.6} -\frac{380}{4 \times 9.81} \; \omega d\omega = \frac{380}{4 \times 2 \times 9.81} \left[(104.6)^2 - (52.3)^2 \right]$$

$$= 4.84 \times 10^4 \left[1.095 - 0.273 \right]$$

$$= 3.98 \times 10^4 \quad Kg.m. \quad = 39.15 \times 10^4 \quad Joules$$

$$= 391.5 \quad KW.sec$$

إن كمية الطاقة التى يبددها الينبوع فى المقاومة بخلاف طاقة الحركة السابقة عبارة عن :

$$\int_0^{t_{br}} 220 \times I_b \, dt = \int_0^{t_{br}} 220 \; (\; 111.7 \; + \; 0.0984 \; n_b \;) \; dt$$

وللحصول على قيمة التكامل لا بد من ايجاد العلاقة بين n_t أو $\frac{\omega_b}{2\pi}$ والزمن t . لذلك نلجأ إلى افتراض أن عزم الدوران الفرملى T_b ثابت القيمة تقريبا فى خلال هبوط السرعة من ١٠٠٠ إلى ٥٠٠ لفـة فى الدقيقة ، والحقيقة أن علاقته مع n_b تبين أن قيمته تهبط من ٣٩ كجم متر عند ١٠٠٠ لفة فى الدقيقة إلى ٥ر٣٠ كيلو جرام . متر عند ٥٠٠ لفـــة فى الدقيقة . بذلك نستطيع أن نفترض أن السرعة n_b تتغير خطيا فى خلال فترة الفرملة t_{br} (العجلة منتظمة على أساس ثبات قيمة عزم الدوران) بحيث تصبح :

$$n_b = n_{b2} + \frac{n_{b1} - n_{b2}}{t_{br}} \; (t_{br} - t)$$

$$= 500 \; + \; \frac{500 \times 60}{14.7} \left(\frac{14.7}{60} - \frac{t}{60} \right)$$

$$= 500 + 500 - \frac{500}{14.7} \; t = 1000 - \frac{500}{14.7} \, t$$

$$= 1000 - 30.4t$$

وهـــذا يعنى أن عجلة التقصير الزاوية ، التى اعتبرناها ثابتة ، هى $\frac{2 \; \pi \times 500}{14.7} = 68.2 \; \pi$ زاوية بنصف قطرية فى الدقيقة لكل ثانية .

وتكون كمية الطاقة المطلوبة هى

$$\int_{t_{br}=0}^{t_{br}=14.7} 220\times111.7\ dt + \int_{t_{br}=0}^{t_{br}=14.7} 98.4\ dt - \int_{t_{br}=0}^{t_{br}=14.7} 2.99\ t\ dt \quad \text{Joules}$$

$$= 220\times111.7\times14.7 + 98.4\times14.7 - \tfrac{1}{2}\times2.99\times(14.7)^2 \quad \text{Joules}$$

$$= 36[illegible]\times10^4 + 0.14[illegible]\times10^4 - 0.0323\times10^4 \quad \text{Joules}$$

$$= 36.2124\times10^4 \ \text{Joul} = 362.124 \ \text{KW.sec}$$

إن كمية الطاقـــة التى تتبدد فى المقاومه الكلية لدائرة المنتج ، التى تبلغ ١٫٩٦٦ أوم هى مجموع كميتي الطاقة اللتين حصلنا عليهما فيما سبق أى

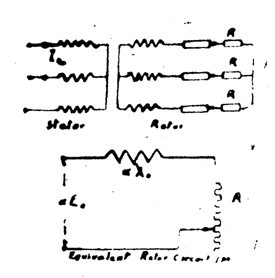
$$(39.15 + 36.2124)\times10^4 = 75.3624\times10^4 \ \text{Joules}$$

(١٣ –) فرملة المحركات التأثيرية باستخدام التيار المستمر :

عند فصل المحرك التأثيرى من الينبوع فسوف يمر بعض الوقت حتى يصل العضو الدائر إلى حالة السكون ، حيث تكون طاقة الحركة المختزنة فى الكتل الدائرة قد استنفذت فى مفقودات الاحتكاك ولقصر هذا الوقت ، للدواعى الإقتصادية ، أو دواعى الأمن . يمكن تغذيه العضو الثابت بين طرفين من أطرافه الثلاثة بتيار مستمر ، وتوصيل الحلقات الانزلاقية إلى مقاومات خارجية ، قد تكون هى نفسها مقاومة البدء ، أو الاكتفاء بمقاومه ملفات العضو الدائر وهو مقصور . وتعزى سرعة وصول العضو الدائر إلى حالة السكون ، على هذا النحو ، إلى زيادة استهلاك طاقـة الحركة المختزنة فى الكتل الدائرة فى مفقودات الحـــديد الناشئة عن وجود المجـــال المغناطيسى ، الذى يصنعه التيار المستمر ، إلى جانب مفقودات النحاس فى مقاومات العضو الدائر ، بسبب التيارات التأثيرية الناتجة عن حركة الملفات فى ذلك

المجال . والحقيقة أنه يمكن اعتبار المحرك ، فى خلال فترة الايقاف ، مولد تيار متردد ذا سرعة متغيرة (من n إلى الصفر) ، يأخذ القدرة الميكانيكية من طاقة الحركة الكامنة فى الكتل الدائرة على عمود الإدارة . ويكون تيار التنبيه فى هذه الحالة ، هو التيار المستمر فى ملفات العضو الثابت (قائمة بذاتها ، أو مع المقاومات الموصلة إليها عن طريق الحلقات الانزلاقية) ، كما أن ملفات العضو الدائر تعتبر دائرة الحمل الذى تستهلك فيه الطاقة الكهربية على شكل مفقودات حرارية .

ويمكن توصيل الحلقات الإنزلاقية إلي مقاومة ثلاثية المراحل ، كما يمكن أن توصل مقاومة مفردة بين حلقتين ، وتترك الثالثة مفتوحة بدون توصيل. ففى الحالة الأولي نحصل على تيارات ثلاثية المراحل فى دائرة العضو الدائر خلال فترة الفرملة ، وفى الحالة الثانية نحصل على تيارات احادية المرحلة ، وفى كلتا الحالتين يعمل المحرك كمولد تيار متردد ، ثلاثى المراحل أو احادى المرحلة ، على حسب الأحوال .



(شكل ٩ ـ ٦)

يبين شكل (٩ ـ ٦) دائرة التيار المتردد المكافئة لكل مرحلة فى العضو الدائر . سوف نفترض أن E_0 هى القوة الدافعة الكهربية التى تتولد فى هذه المرحلة عند سرعة التزامن n_0 بفعل المجال المغناطيسي الناشيء عن تيار التنبيه المستمر فى العضو الثابت ، وأن X_0 هى ممانعة التزامن لنفس المرحلة عند نفس

السرعـة . فى خلال فترة الفرملة تتغير القوة الدافعة الكهربية إلي E والممانعة إلي X على حسب السرعة n . فاذا كانت $\alpha = \frac{n}{n_0}$ ، نجد أن :

$$E = \alpha E_0 \quad , \quad X = \alpha X_0 \qquad (٦-٣٣)$$

فاذا كانت R هى المقاومة المرحلية فى دائره العضو الدائر و I التيـار المرحلي عندالسرعة n ، نجد أن:

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{\alpha E_0}{\sqrt{R^2 + \alpha^2 X_0^2}} \qquad (٦-٣٤)$$

وتكون القدرة P المستهلكة فى دائرة العضو الدائر، على حساب طاقة الحركة الكامنة في الكتل الدائرة ، ومن ثم عزم الدوران T ، عبارة عن :

$$P = 3 I^2 R = \frac{3 E_0^2 \alpha^2 R}{R^2 + \alpha^2 X_0^2} \text{ Watts} \qquad (٦-٣٥)$$

$$T = 0.973 \frac{P}{n} = \frac{2.919 E_0^2}{n_0} \times \frac{\alpha R}{R^2 + \alpha^2 X_0^2} \text{ Kg. m.}$$

(٦-٣٦)

وبذلك يكون عزم الدوران متناسبا مع α ، أى مع السرعة ، ولكى نحصل على النهاية العظمى لعزم الدوران T_m ، فى خلال فـترة الفرملة ، نفاضـل بالنسبة لـ α ، ونساوى بالصفر ، على النحو التالي :

$$T = C \frac{\alpha \frac{R}{X_0}}{R^2/X_0^2 + \alpha^2} \quad , \quad C = \frac{2.919 E_0^2}{n_0 X_0}$$

(٦-٣٧)

$$\frac{dT}{d\alpha} = 0 \;, \quad K \left\{ \left(\frac{R^2}{X_0^2} + \alpha^2 \right) \frac{R}{X_0} - 2 \alpha^2 \frac{R}{X_0} \right\} = 0$$

(الاشارة السالبة لاتجاه الدوران المضاد) $\therefore \alpha_m = \pm \frac{R}{X_0}$

(٦ – ٣٨)

حيث α_m هى القيمة عند النهاية العظمى لعزم الدوران T_m .

$$T = 2 \, T_m \, \frac{\alpha \, \alpha_m}{\alpha^2 + \alpha_m^2} \text{ Kg.m.} \qquad (٦ – ٣٩)$$

$$T_m = \frac{2.919 \, E_0^2}{2 \, n_0 \, X_0} = \frac{1}{2} \, C \text{ Kg.m.}$$

يتضح من المعادلة (٣٩ – ٦) أن منحنى عزم الدوران T مع السرعة n (أو $\alpha \, n_0$) ، يماثـل عزم الدوران مع الانزلاق للمحرك ، المغطى فى شكل (٤ – ١) ، وذلك على أساس التماثـل القائم بـين المعادلتين (٢٠ – ١) و (٣٩ – ٦) . ويكون عزم دوران المولد فى هذه الحالة عبارة عن عزم الدوران الفرملى للمحرك T_b ، فى خلال فترة الفرملة . فاذا كانت J هى عزم القصور الذاتى للكتل الدائرة على عمود إدارة المحرك فى هذه الفترة ، وكانت ω هى السرعة الزاوية بعد أية لحظة t من بداية الفرملة ، نجد أن

$$T = T_b = J \, \frac{d\omega}{dt} \; , \; \omega = \alpha \, \omega_0 \; , \; \alpha = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{n}{n_0} \qquad (٦ – ٤٠)$$

إذا كانت Ψ هى زاوية دوران العضو الدائر في خلال فترة الفرملة ، حتى يصل الى حالة السكون ، نجد أن :

$$d \, \Psi = \omega \, dt = \frac{J}{T} \, \omega \, d\omega \quad , \quad dt = \frac{J}{T} \, d\omega \qquad (٦ – ٤١)$$

ويكون زمن الفرملة t_b ، بناء على ذلك ، عبارة عن :

$$t_b = \int_0^{t_b} dt = \int_{\omega_0}^{0} \frac{J}{\omega} d\omega = \int_{\omega_0}^{0} \frac{J}{2\ T_m\ \omega_m} \times \frac{\alpha_m{}^2 + \alpha^2}{\alpha}\ d\omega$$

$$= \int_{\omega_0}^{0} \frac{J}{2\ T_m\ \omega_m{}^2} \times \frac{\omega_m{}^2 + \omega^2}{\omega}\ d\omega \qquad (٦-٤٢)$$

$$\alpha_m = \frac{\omega_m}{\omega_0}\ , \quad d\omega = \omega_0\ d\alpha \qquad (٦-٤٣)$$

بالتعويض من (٣٩ – ٦) و (٤٣ – ٦) فى (٤١ – ٦) ، نجد أن :

$$d\Psi = \frac{J\ \omega_0{}^2}{2\ T_m\ \alpha_m} \times \frac{\alpha_m{}^2 + \alpha^2}{\alpha}\ \alpha\, d\, \alpha$$

$$\Psi = \int_{\alpha=1}^{\alpha=0} d\,\Psi = \left[\frac{J\omega_0{}^2}{2\ T_m\ \alpha_m} \left(\alpha\ \alpha_m{}^2 + \frac{\alpha^3}{3} \right) \right]_1^0$$

$$= - \frac{J\ \omega_0{}^2}{2\ T_m} \left(\alpha_m + \frac{1}{3\ \alpha_m} \right) \qquad (٦-٤٤)$$

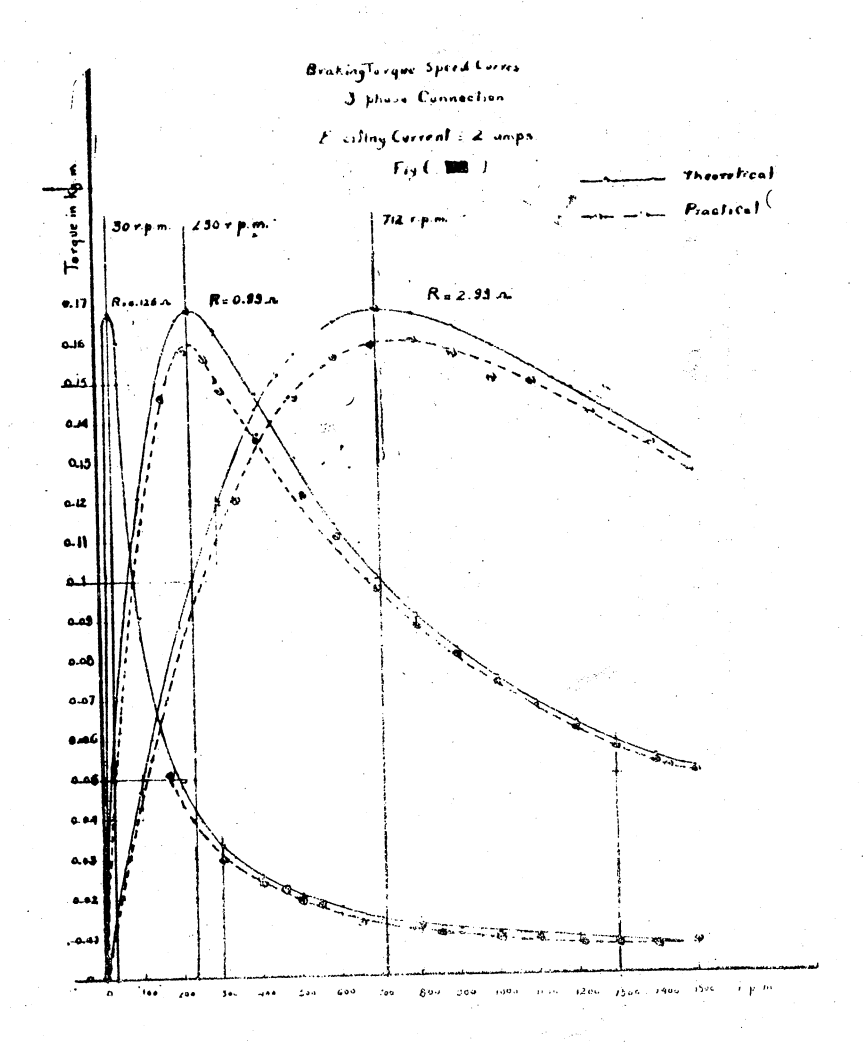
تتوقف قيمة T_m على قيمة تيار التنبيه بطبيعة الحال ، وبثبوت قيمة تيار التنبيه تختلف قيمة Ψ فى المعادلة (٤٤ – ٦) باختلاف قيمة α_m ، وبالتالى قيمة المقاومة R فى دائرة العضو الدائر . ولكى نحصل على قيمة النهاية الصغرى للزاوية Ψ نفاضل المعادلة (٤٤ – ٦) ، ونساوى بالصفر ، حيث نجد أن :

$$\frac{d\Psi}{d\ \alpha_m} = 0\ , \quad \alpha_m{}^2 = \tfrac{1}{3}\ , \quad \alpha_m = \sqrt{\frac{1}{3}} = .578 \qquad (٦-٤٥)$$

وهذا يعنى أن الحصول على أقل قيمة ممكنة للزاوية Ψ ، مع ثبوت قيمة

تيـار التنبيه ، تستلزم أن تكون قيمة المقاومة المرحلية R في دارة العضو الدائر (داخلية وخارجية) عبارة عن :

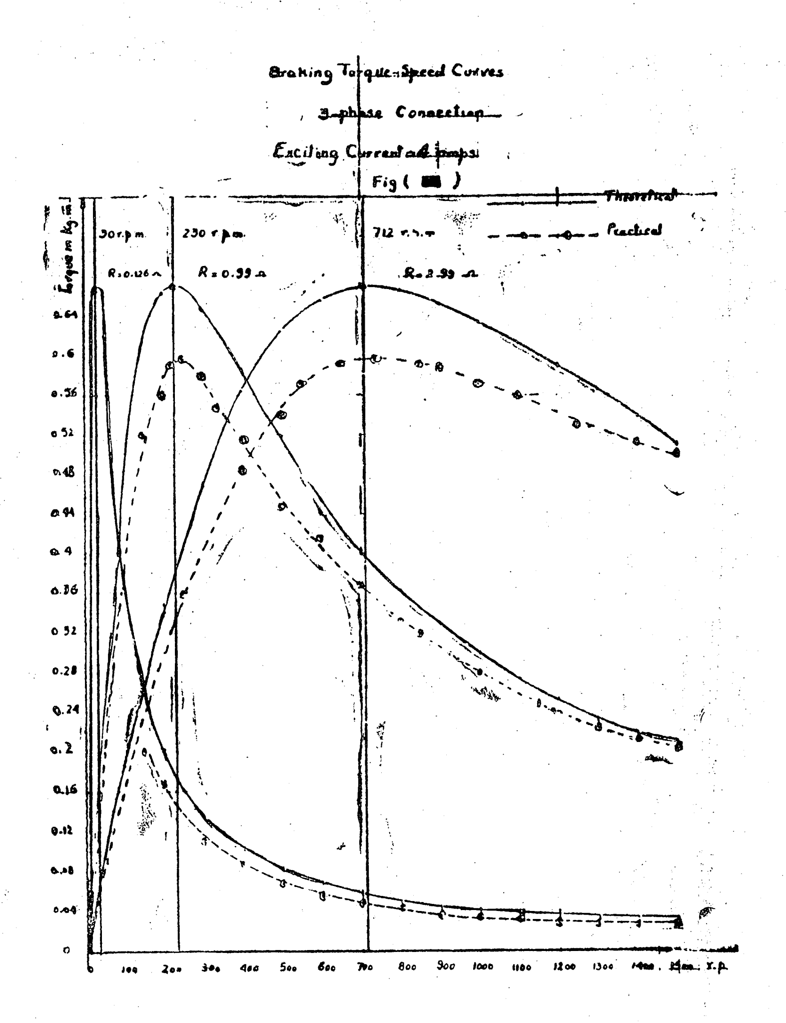
$$R = 0.578\ X_0 \qquad (٤٦ - ٦)$$



شكل(١٠ – ٦)

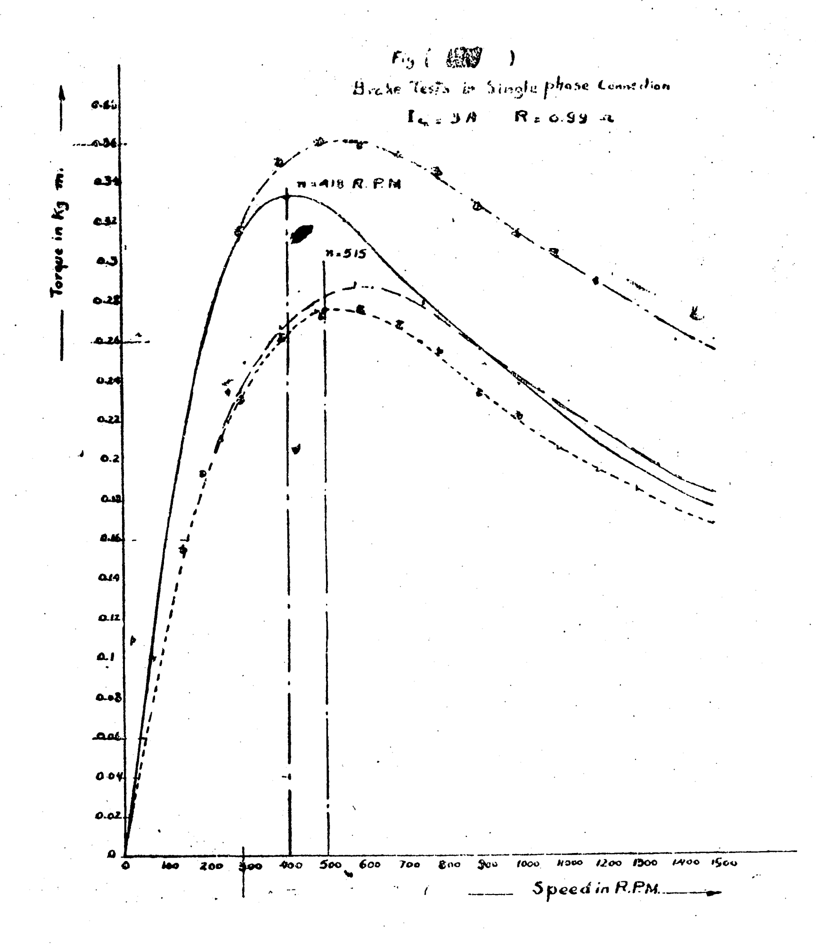
يبين شكل (١٠ – ٦) منحنيات عزم الدوران الفرملي مع السرعة في خلال فترة الفرملة ،على أساس المعادلة (٣٩ – ٦) [نظريا وعمليا على أحد المحركات] ،

عند تيار التنبية ٢ أمبير، ومقاومات مختلفة، كما يبين شكل(١١ – ٦) المنحنيات المناظرة عندما تكون قيمة تيار التنبيه ٤ أمبير .



شكل (١١–٦)

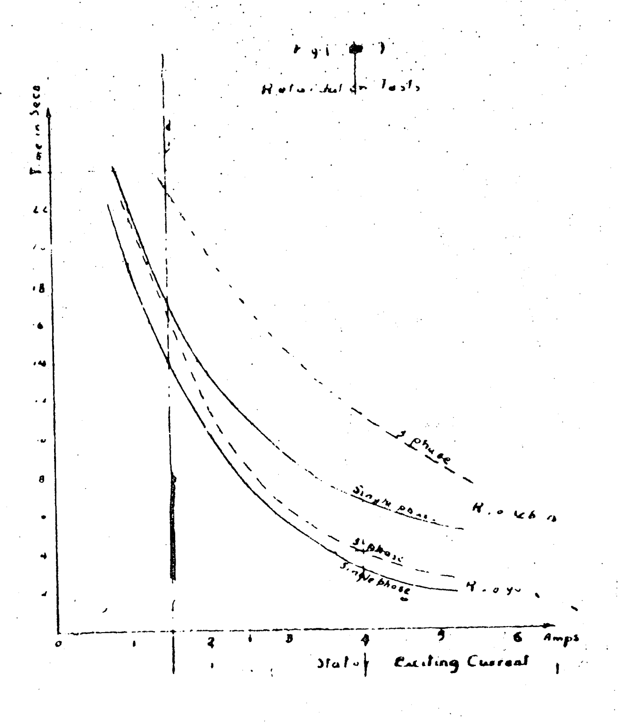
ويبين شكل (١٢– ٦) منحنيات الفرملة فى حالة استخدام دائرة احادية المرحلة فى العضو الدائر .



شكل (١٢ – ٦)

هذا ويتوقف زمن الفرملة بطبيعة الحال على كل من قيمة المقاومة المرحلية فى دائرة العضو الدائر R ، وقيمة تيــار التنبيه ، ونوع التوصيل في العضو الدائر ، كما هو مبين في شكل (١٣ – ٦)

ويمكن استخدام المعادلة (٢٨ – ٦) لحساب زمن الفرملة ، مع التعويض عن T_{br} فيها بعزم الدوران T ، المعطى بالمعادلة (٣٦ – ٦) ، ووضع $\alpha = \frac{n}{n_0}$

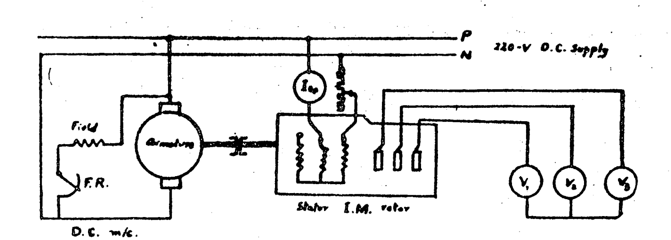


(شكل ١٣ – ٦)

في هذه المعادلة ، باعتبار أن n_0 هى نفسها n_m . وسوف تواجهنا في هـذه الحالة مشكلة عدم وجود قيمة محددة للتكامل عند السرعة صفر ، حيث تصبح هذه القيمة مالانهاية ، ونتغلب على هـذه الصعوبة بالحل البيانى ، كما سيرد شرحه فى الباب التالى .

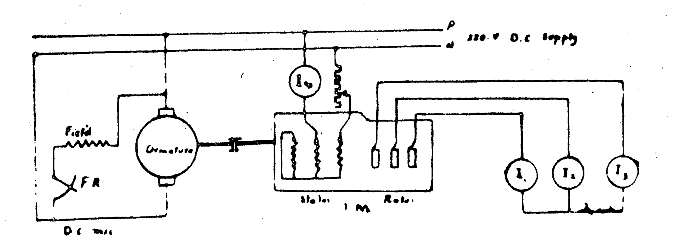
يتبين من المنحنيات المعطاة فى شكل (١٣ – ٦) أن زمن الفرملة يقل مع توصيل العضو الدائر أحادى المرحلة ، ذلك لأن المساحة المحصورة تحت منحنى عزم الدوران الفرملى تكون فى حالة توصيل العضو الدائر احادى المرحلة أكبر منها فى حالة توصيل العضو الدائر ثلاثى المراحل ، وهـــذه المساحة تتناسب مع كمية الطاقــة المبددة على حساب كمية الطاقــة المختزنة في الكتل الدائرة .

بالنسبة لقيمة كل من E_0 ، X_0 في المعادلات السابقة ، فانه يمكن الحصول عليهما باجراء اختبار اللاحمل والدائرة المقصورة للمحرك ، وهو يعمل كمولد بتيار التنبيه المحدد ، عند السرعة n_0 ، وذلك بنفس الطريقة التى اتبعناها مع الآلات المتزامنة . شكل (١٤ - ٦) يبين كيفية توصيل المحرك ، الذى يدار عند السرعة n_0 بآلة تيار مستمر ، وذلك للحصول على منحنى الدائرة المفتوحة.



(شكل ١٤ - ٦)

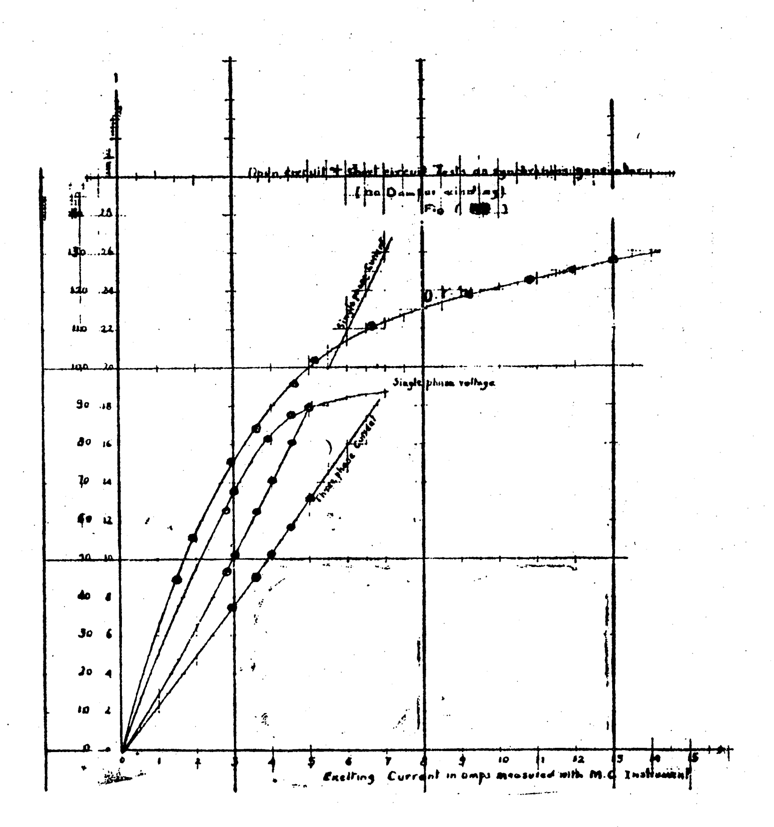
يبين شكل (١٥ - ٦) كيفية التوصيل للحصول على منحنى دائرة القصر ، وذلك عندما يدار المحرك بالسرعة n_0 .



شكل (١٥ - ٦)

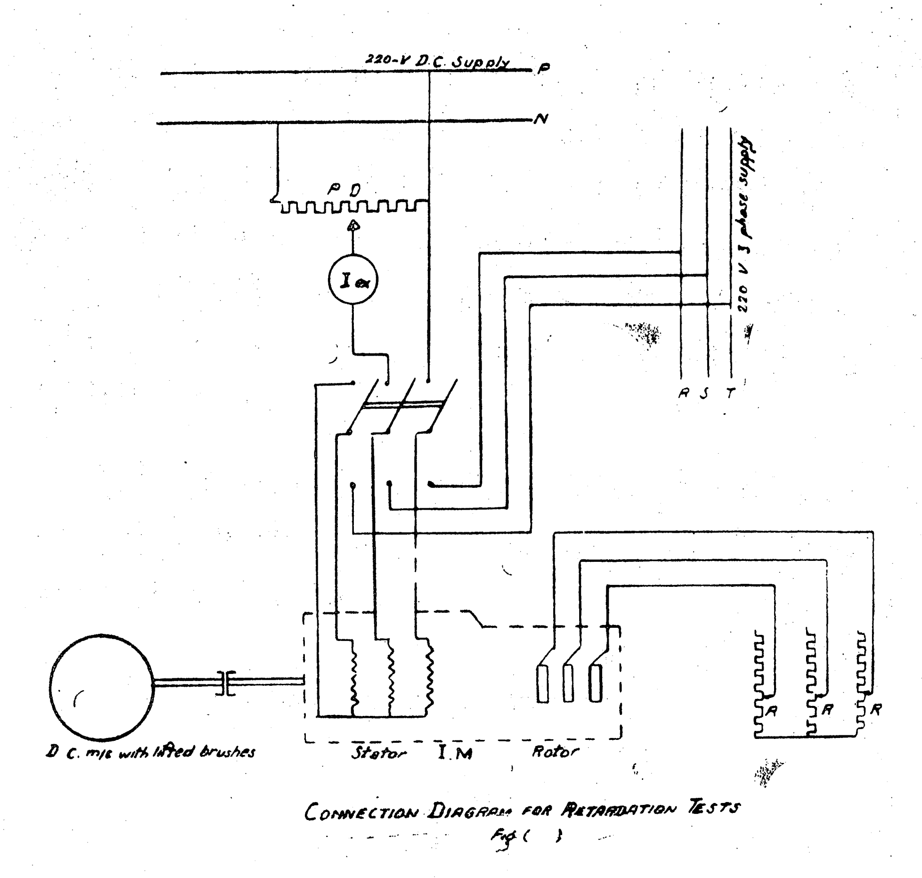
يبين شكل (١٦ - ٦) نتائج اختبار الدائرة المفتوحة ودائرة القصر على المحرك المبين منحنيات عزم الدوران الفرملى له فى شكلى (١٠-٦) و (١١-٦)، وذلك عند سرعة التزامن الخاصة به ، وهى ١٥٠٠ لفة فى الدقيقة . ويمكن تحديد E_0 عند تيار التنبيه المستعمل من منحنى الدائرة المفتوحة ، كما أن قيمة

X_0 المناظرة هى عبارة عن خارج قسمة E_0 التى حصلنا عليها مقسومة على تيار القصر عند نفس تيار التنبيه على منحنى دائرة القصر . وهذه هى نفس الطريقة التى اتبعناها للحصول على قيمة معاوقة التزامن بالنسبة للآلات المتزامنة .



(شكل ١٦ - ٦)

يبين شكل (١٧ - ٦) كيف يتم توصيل المحرك خلال فترة الفرملة ، بعد فصله من الينبوع .



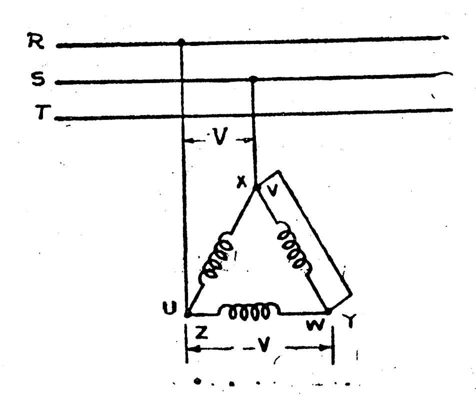
(شكل ١٧-٦)

(١٤ – ٦) فرملة المحركات التأثيرية باستخدام التوصيلات غير المتماثلة لملفات العضو الثابت مع الينبوع ، وتوصيل مقاومات فى دائرة العضو الدائر .

يتولد عزم دوران فرملى ، وهو عـزم الدوران الناشىء عن المجـال المغناطيسى الخلفى ، عندما تكون ملفات العضو الثابت للمحرك التأثيرى موصلة بصورة غير متماثلة مع الينبوع . وهذا هو نفسه عزم دوران مجموعة ضغوط التعاقب المرحلى السالب، كما سبق شرحه عند الحديث عن التوصيلات غير المتماثلة فى المحركات التأثيرية .

ولكى يمكن لعزم الدوران الفرملى المذكور أن يهبط بسرعة المحرك حتى حالة السكون ، يجب أن يكون أكبر من عزم الدوران الناشيء عن المجال المغناطيسى الأمامى ، وهو الخاص بمجموعة ضغوط التعاقب المرحلى الموجب ، وذلك بعد فصل المحرك من الينبوع ، واعادة توصيله بصورة غير متماثلة ، تمهيداً لفرملته . كما يجب أن يتلاشى الفرق بين عزمى الدوران الفرملى والامامى ، عندما يصل المحرك إلى حالة السكون ، حتى لا يدور المحرك فى الاتجاه المضاد .

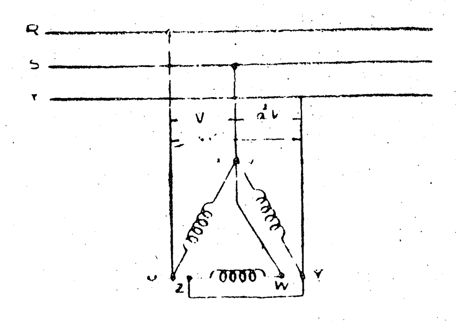
يبين شكل (١٨-٦) توصيلة تقليدية من هذا النوع لفرملة المحرك ، وهى خاصة بشركة AEG ، ويطلق عليها اسم توصيلة جوردان كربس Jordan-Krebs connection .



(شكل ١٨-٦)

كذلك يبين شكل (١٩-٦) توصيلة أخرى تستخدم لنفس الغرض ، وهى عبارة عن توصيلة احادية المرحلة .

هذا ويمكن عن طريق إضافة مقاومات فى دائرة العضو الدائر العمل على تغيير أشكال منحنيات عزم الدوران لتحقيق الهدف المنشود .



شكل (١٩-٦)

وبالنسبة لشرط تلاشي الفرق بين عزمي الدوران الفرملي والأمامي عند S = 1 ، نجد أنه يتحقق تلقائيا عند استخدام التوصيلتين المبينتين فى شكلى (١٨ - ٦) و (١٩ - ٦) ، وذلك لأن ضغط مجموعة التعاقب المرحلي الموجب V_p يساوى ضغط مجموعة التعاقب المرحلي السالب V_n فى كلتا الحالتين ، مما يعنى تساوى عزمي دوران المجموعتين عند S = 1 .

مثال محلول :

1) An electric drive for crane work is tested with empty hook in two ways. First a retardation test is made and the following readings are recorded:

time (seconds)	0	2	4	8	12	18
speed of motor shaft (r.p.m.)	1200	1000	840	600	410	200

Second the input to the motor is measured as 14 KW at the no load speed of 985 r.p.m. The motor is 6 pole 3-phase induction and has the following efficiency curve.

Total mechanical power output (KW):	7	10	14	22	30
efficiency	0.5	0.66	0.81	0.94	0.93

When the hook carries a weight of 50 tons, moving steadily at

a speed of 90 m/min the motor speed is 970 r.p.n. The motor is rated at 32 KW, has a ratio rotor phase resistance to standstill reactance of 0.15 and a short-circuit current 4 times the full load current.

Find the starting time of the drive, and the distance moved by the load before attaining the steady speed.

$$S = \frac{1000 - 970}{1000} = 0.03 \quad , \quad \alpha = 0.15$$

$$T_{fl} = \frac{973 \times 32}{970} = 32.15 \quad \text{Kg.m.}$$

$$T_{max} = 32.15 \, \frac{9 \times 10^{-4} + 225 \times 10^{-4}}{90 \times 10^{-4}} = 83.6 \quad \text{Kg.m}$$

$$T_s = (4)^2 \times 0.03 \times 32.15 = 15.36 \quad \text{Kg.m.}$$

$$T_{st} = \frac{T_{max} + T_s}{2} = \frac{83.2 + 15.36}{2} = 49.28 \quad \text{Kg.m.}$$

$$v_{max} = \frac{90}{60} = 1.5 \text{ m/sec}$$

$$(GD^2)_l = 365 \, \frac{50000 \times (1.5)^2}{(970)^2} = 43.8 \quad \text{Kg.m.}^2$$

$$(GD^2)_m = \frac{365 \, \eta \, P_0}{n_{mo} \dfrac{dn_{mo}}{dt}} = 365 \, \frac{0.81 \times 14 \times 10^3}{985 \times \dfrac{985}{11.6}}$$

$$= 49.4 \quad \text{Kg.m}^2$$

$$(GD^2)_d = 1.2 \times 49.4 + 43.8 = 103.1 \quad \text{Kg.m.}^2$$

$$t_{st} = \frac{103.1 \times 970}{375 \, (49.28 - 32.15)} = 15.45 \text{ secs}$$

$$h = \frac{1 \cdot 5}{2} \times 15.45 = 11.6 \quad m$$

مثال محلول :

2) A 16.4 HP, 220 V, 4-poles, 50 Hz, 3-phase, delta connected squirrel cage induction motor, develops a maximum torque of 2.25 full load torque at a slip of 0.15, when operated at rated voltage and frequency. The motor has a short circuit current which is five times the full load current, and is started by a star delta switch. If the fly wheel moment of the rotor with connected load referred to the motor shaft is 20 kg.m², find the per unit of full load torque against which the motor could be started, so that the starting time might not exceed 14 seconds.

$$\frac{T_{max}}{T_{fl}} = 2.25 = \frac{s_{fl}^2 + (0.15)^2}{2 \times s_{fl} \times 0.15} \quad , (\alpha = 0.15)$$

$$\therefore \quad s_{fl}^2 - 0.6755 + 0.0225 = 0$$

$$s_{fl} = \frac{0.675 \pm \sqrt{0 \cdot 455 - 0.090}}{2}$$

$$s_{fl} = 0.035 \text{ , } n = 1500 \times 0\ 965 = 1446 \text{ r.p.m.}$$

$$T_{fl} = 973 \times \frac{(16.4 \times 0.746)}{1446} = 8.22 \quad \text{Kg.m.}$$

$$T_s = \frac{1}{3} \times (5)^2 \times 0.035 \ T_{fl} = 0.2915 \ T_{fl}$$

$$T_{st} = \frac{1}{2} \ (\ T_s + T_{max} \ ) = \frac{1}{2} \ (\ 0.2915 + 2.25 \ ) \ T_{fl}$$

$$= 1.27 \ T_{fl}$$

X = Per unit of F.L. Torque against which motor could be started.

$$t_{s1} = \frac{GD^2 \times 1446}{375\ (\ 1.27\ T_{f1} - X\ T_{f1})} = 14$$

$$(\ 1.27 - X) = \frac{20 \times 1446}{375 \times 8.22 \times 14}$$

$$X = 0.6$$

الباب السابع

تطبيقات على وسائل التحريك الكهربى

(أولا) المبادىء الأساسية لوسائل الجر الكهربى

(Basic principles in electric traction)

(٧ - ١) الأنظمة المستخدمة فى وسائل النقل الكهربى :

(Different Systems applied in electri transportation)

يوجد نوعان أساسيان من الأنظمة المستخدمة فى وسائل النقل الكهربى، يختلف كل منهما عن الآخر بالنسبة لموضع الينبوع الذى يغذى المحرك الكهربى، القائم بالتحريك ، بالطاقة الكهربية . ففى النوع الأول ، وهو القاصر على وسائل النقل البرى عادة ، ويطلق عليها اسم الجر الكهربى (electric traction) يوصل المحرك الكهربى الذى تحمله القاطرة إلى شبكة الأسلاك الممتدة من محطة التغذية (أو مجموعة المحطات المترابطة بالنسبة للمؤسسات الكبيرة) ، التى تولد فيها الطاقة الكهربية على نطاق يكفى لتغذية جميع المركبات المنتشرة على كافة الخطوط ، ثم يتم توزيع الطاقة على هـــذه المركبات عن طريق شبكة الأسلاك التى توجد فى كل طريق . وقد يستدعى الأمر ، فى هـذه الحالة وجود محطات فرعية (substations) لتعويض الضغط المفقود فى أسلاك النقل ، إذا كان هـذا يحدث بسبب طول الطريق . ويختلف نوع محطات التوليد ، من حيث كونها للتيار المتردد أو التيار المستمر ، على حسب نوع المحركات التى تسير المركبات وهل هى محركات تيار متردد أو محركات تيار مستمر ، وقد يقتضى الأمر ، عند استخدام محركات التيار المستمر ، ووجود شبكة عمـــومية (The Grid) للتيـــار المتردد ، انشاء محطات تحويـــل (Converting stations) لتغذيـــة شبكة أسلاك الجر الكهربى ، أو يمكن تغذيتها من الشبكة العمومية مباشرة ، مع تزويد المركبات بالأجهزة التحويل المناسبة ، التى تربط بين محرك التيار المستمر ، وينبوع التيار المتردد .

النوع الثانى من أنظمة وسائل النقـل الكهربى الأساسية هو ذلك الذى تحمل فيه الوسيلة على ظهرها ، سواء كانت قطارا ، أو سفينة، أو جرارا أو ما أشبه، جميع مقومات توليد الطاقة الكهربية أو مخزونها التى تشتمل ، بالنسبة للتوليد ، على جميع مهمات محطة توليد كهربية كاملة من آلة ميكانيكية بوسائل تشغيلها ، ومولد كهربى بأجهزة نقل الطاقــة الكهربية إلى المحرك الكهربى القائم بالتحريك ، وتشتمل ، بالنسبة للتخزين ، على كل ما يلزم من البطاريات ووسائل صيانتها وتعويض المخزون من الطاقة الكهربيه بهـا وتكون الآلة الميكانيكية المستخدمة فى القطارات والسفن ، التى تنضوى تحت لواء هـذا النوع ، من نوع الديزل ، فتوصف لذلك بانها قطارات أو سفن ديزل كهربية (Diesel electric trains or ships) ، بينما تستخدم الجرارات (Trucks) واللوريات (Lorries) ، الآلة التى تـدار بالبترول ، فيطلق عليها لذلك اسم جرارات أولوريات البترول الكهربية (Petrol-electic trucks or Lorries) أما مركبات الطرق البرية (road vehicles) فهى التى تحمـل البطاريات ، وتعمل بمخزون الطاقة الكهربية .

هذا وسوف تقتصر دراستنا فى هذا الباب على بعض ما يدخل فى نطاق وسائل الجر الكهربى ، أى النقل الـبرى ، وما يخص القطارات الكهربيه منها بالذات .

(٢ - ٧) مزايا وعيوب استخدام وسائل الجر الكهربى .

(Advantages and disadvantages of Electric Traction)

لاشك أن من أهم مزايا استخدام المحرك الكهربى فى وسائـل الجر هو النظافة التامة التى تصاحب ذلك ، وهو مغنم كبير ، وخصوصا فى النقـل على الطرق تحت الأرضية (sub - Ways) ، وفى الأنفاق (Tunnels) ، كما أن تغير السرعة، بالغ النعومة فى التدرج (very smooth variation of speed) ،

الذى يمكن أن يوفره لنا المحرك الكهربى ، بالإضافة إلى التعجيل عالى القيمة ، الذى يبلغ من ١ر٦ إلى ٢ر٣ كيلو متر/الساعة فى كل ثانية بالقياس إلى ٦٥ر٠ إلى ٩ر٠ الذى نحصل عليه فى حالة القطارات التى تسير بالبخار ، من المزايا بالغة الأهمية ، وبخاصة بالنسبة لحركة النقل إلى الضواحى (Snburban Traffic)، حيث يحتاج الأمر إلى تسيير القطارات فى دورات سريعة ، مع مراعاة تعدد محطات الوقوف ، وذلك في أوقات الازدحام (rush hours) ، في الصباح وفى الظهيرة وعند المساء . كذلك يمكن باستخدام الجر الكهربى حمل ضعف العدد من الأنفس على نفس الطريق ، ومع وجود نفس عدد المحطات ، التي تستخدم فى حالة القطارات البخارية، وذلك بسبب ارتفاع قيمة " السرعه " مع وجود عدد كبير من المحطات فى الجر بالكهرباء . هذا ونظرا لأن اتساع المحطات فى المدن تحده الاعتبارات الإقتصادية، بالنسبة لوجود عدد كبير من المحطات ، يعد حسن التحكم في القاطرة الكهربية من المزايا الكبيرة ، لأنها تساعد على جعل المحطة ، التى لايمكن أن تتواجد فيها سوى قاطرة بخارية واحدة، تستوعب قاطرتين كهربائيتين في نفس الوقت .

تحتاج القاطرة الكهربية إلى وقت أقل بكثير مما تحتاجه القاطرة البخارية للصيانة والاصلاح ، مما يجعلنا نستطيع استخدام عدد أقل من القاطرات الكهربية فى خدمة مرور ذى كثافة معينة ، كما أن تكاليف صيانة واصلاح هذه القاطرات يبلغ ٥٠٪ فقط من تلك التى تحتاجها القاطرات البخارية . ونظرا لأن القاطرة الكهربية لاتحتاج الى وقت لتجهيزها للعمل، بينما تحتاج القاطرة البخارية الى مالا يقل عن ساعتين حتى يتولد فيها البخار ، فانه يمكن تنظيم العمل بكفاءة أكثر علوا فى حالة القاطرات الكهربية ، خاصة بالنسبة للسائقين الذين يتوالون العمل على قيادة هذه القاطرات .

وان التخلص من الأدخنة الكثيفة ، والجمرات التى تتطاير من القطارات البخارية ، لهو فى حد ذاته مكسب كبير فى حالة الجر الكهربى ، حيث تكون القيادة أكثر أمنا ، ولا تتعرض المبانى والأجهزة للتلف بسبب عوامل

التصدية" الناشئة عن سحب الدخان والبخار المتصاعدة من القاطرات البخارية. كذلك تنعكس فوائد الفرملة بالوسائل الكهربية على عمر الفرامل بالاطالة ، نتيجة لبطء استهلاكها ، كما انها غالبا ما تخفض تكاليف الخدمة ، وخصوصا فى الأحوال التى تسترجع فيها الطاقة الى الينبوع بدلا من تبديدها .

هـــذا بالنسبة لمزايا الجر الكهربى اذا قورن بالجر باستخدام القطارات البخارية ، وبخاصة داخل المدن ، أما بالنسبة للمساوىء فيأتى فى المرتبة الأولى أن أى عطل فى الينبوع لمدة دقائق سوف يؤدى الى ارتباك فى حركة مرور القطارات قديمتد الى بضع ساعات ، كما أن خطوط النقــل الكهربية الخاصة بالتلغراف أو التليفون ، والتى لا بد وأن تجرى بحذائها عادة شبكة تغذية القطارات الكهربية ، سوف تتأثر بهذه الشبكة ، ممـا ينتج عنه غالبا حدوث تشويش فى الرسائل التى تنقلها ، بسبب ظاهرة التداخل (interference) بين الخطوط الممتدة على نفس الطريق .

(٣ ـ ٧) الانظمة المختلفة لتغذية شبكات الجر الكهربى :

(Different supply systems in electric traction)

يتم توليد التيار المستمر (أو تحويله من تيار متردد) لتغذية شبكات الجر الكهربى ، كما يمكن التغذية بالتيارالمتردد ، أحادى المرحلة أو ثلاثى المراحل. وهذا يحدد بطبيعة الحال نوع المحرك الذى يقوم بالتحريك الكهربى . وعند الاصرار على استخدام محرك التيار المستمر ، وهو ذو مميزات خاصة فى هـذا المجال ، يجب توافرجهاز التحويل المناسب على القاطرة ، بين الشبكة والمحرك ، للمواءمة بين نظام الينبوع ونوع المحرك .

تكون التغذية بالنسبة لعربات الترام (tram-Cars) بالضغط المستمر على حـــوالى ٦٠٠ فولت ، وتمثل القضبان (rails) الخـط الراجع بالتيار (return line) . ونظرا لأن هذه القضبان تجرى في الأرض ، فهناك احتمال

لحدوث تيارات تسرب (leakage currents) تتسرب منها الى أية خطوط أنابيب قريبة ، مما يسبب المتاعب بالنسبة لصيانة هــذه الأنابيب ، وكذلك أدائها مهامهــا على الوجه المطلوب . لذلك يتحتم مراعاة أن تكون القضبان ذات توصيل كهربى عالى الجودة ، بحيث يسهل على التيار المرور فيها ، وعـــدم الإنتشار حولها الى مسافات بعيدة . وتنص التنظيمات (regulations) الخاصة في هذا الشأن على ألا يزيد هبوط الضغط عن ٧ فولت بين أية نقطتين على الخط الراجع ، وهو المتصل بالقطب السالب لينبوع التيار المستمر . وليس من الحكمة فى شيء استخدام قضبان ضخمة ذات مقاطع كبيرة لتقليل مقاومتها ، وبالتالى تنفيذ هــذا الشرط ، عندما يكون التيار كبيرا ، وانما تستخدم فى مثل هذه الأحوال الإضافات (boosters) لتعويض هبوط الضغط من نقطة لأخرى (هندسة الآلات الكهربية صفحة ٣٦٨) على الخط . وعندما يكون الخط الراجع على مقربة من بعض خطوط الأنابيب فان ضغطه لا يجب أن يرتفع عن ٤ فولت أو ينخفض عن فولت واحد بالنسبة لضغط الأرض . هذا وتتم التغذية من الينبوع باستخدام خط هوائى (trolley Wire) غالبا ، أو خط ممتد فى مجرى أرضي . وفى حالة الخط الهوائى يجب ألا يزيد الضغط عن ٦٥٠ فولت عند محطة التغذية ، ولا يقل عن ٥٥٠ فولت على أية نقطــة على الخط . وبالنسبة لعربات التروللى (trolley buses) يكون الخطان ، التغذية والراجع ، هوائيين ، على ضغط ٦٠٠ فولت ، ولا يحتاج الأمر فى هذه الحالة الى استخدام الإضافات ، حيث لا يخشى من تسرب التيار ، كما هو الحال عند استخدام خط الراجع الأرضي .

ولا يخفى أنه كلما زاد ضغط الينبوع عن ٦٠٠ فولت ، كلمــا حصلنا على خواص تشغيل أفضل بالنسبة للخط والمحرك ، علاوة على المزايا الإقتصادية الناشئة عن قـــلة المفقودات فى الخط والمحرك ، إلا أن احتياطات الأمن ، بالنسبة للانسان والحيوان ، يجب أن تزداد بشكل ملحوظ . وتستخدم فى

ايطاليا وبلجيكا وبولندا ضغوط مستمرة تبلغ ٣٠٠٠ فولت ، وفى مونتريال ٢٤٠٠ فولت ، وفى خط باريس ـ أورليانز ـ ميدى ١٣٥٠ فولت .

وفى حالة استخدام التيار المتردد احادى المرحلة تعمل الخطوط فى النمسا والمانيا والسويد وسويسرا ، وكثير من البلدان الأخرى ، على ضغط ١٥ كيلوفولت بتردد ١٦⅔ هرتز ، وفي بنسلفانيا على ضغط ١١ كيلو فولت بتردد ٢٥ هرتز . ويحد من قيمة التردد ، فى هذا القطاع من قطاعات توليد القدرة الكهربية ، الصعوبات الجمة المرتبطة بعملية التبديل، وهى التى يمكن معالجتها بخفض قيمة الترددفى محركات التيار المتردد أحادية المرحلة ذات المبدل (single phase AC commutator motors) ، التى تستخدم لتحريك القطارات على هذه الخطوط .

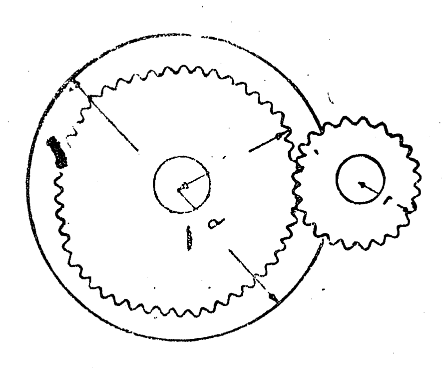
ويستخدم التيار ثلاثى المراحل في تغذية بعض خطوط النقل للجر الكهربى فى بعض النواحى الجبلية فى ايطاليا ، وذلك على ضغط ٣٦٠٠ فولت بين الخطوط. ويستخدم خطان هوائيان فى هذه الحالة ، بينما يمثل القضيب الخط الثالث بالنسبة للمراحل. ولا تستخدم محولات فى هذه الحالة لأن المحركات تعمل على ضغط الخط مباشرة . ويكون التردد ١٦⅔ هرتز ، كما تستخدم الفرملة بالتوليد المرتجع ، وهو ما يمثل احد المزايا الكبرى لهذا النظام فى النواحى الجبلية .

هذا ويشير التطور إلى الانصراف عن استخدام التغذية بالتيار المتردد ثلاثى المراحل ، بينما ينحو بشدة نحو استخدام التغذية بالتيار المتردد احادى المرحلة بالتردد العادى ، أى ٥٠ هرتز ، وإلى حدما نحو التغذية بالتيار المستمر على ضغط عالي .

(٤-٧) قوانين الميكانيكا الخاصة بحركة القطار :

(Mechanics of train motion)

تنتقل الحركة من عمود إدارة المحرك، الذى يبذل عزم الدوران T_m كيلو جرام متر، إلى عمود إدارة عجلتى القيادة (Driving wheel axles)، اللتين تحركان القاطرة على القضبان، باستخدام صندوق تروس لخفض السرعة من n_m لفة فى الدقيقة إلى n لفة فى الدقيقة، حتى يمكن الاستفادة من مزايا المحرك ذى السرعة العالية . يبين شكل (١ — ٧) رسم تخطيطى للمنتج واحد عجلتى



شكل (١ - ٧)

القيادة (Driving wheel) ، وصندوق التروس بينهما ، حيث r هو نصف قطر الترس الصغير ، على عمود إدارة المنتج ، R نصف قطر الترس الكبير الراكب على محور إدارة عجلتى القيادة ، التى قطر كل منها d ، مقاسة جميعها بالامتار . فاذا كانت قوة الجر (tractive effort) التى تحرك كلا من الترسين ، عند التقاء حافتيهما كما هو مبين فى الشكل هى ′f كيلوجرام ، وكانت قوة الجر على عجلة القيادة ، التى تحركها على الطريق ، هى f كيلو جرام ، وباعتبار η ، ε هما معامل الجودة ونسبة التحويل لصندوق التروس، نجدأن:

عزم الدوران الناشى عن قوة الجر على عمود إدارة عجلتى القيـادة T

عبارة عن $d \times f$ أو $R \times f'$ كيلو جرام متر ، وعزم الدوران المعطى على عمود إدارة المحرك عبارة عن T_m ، وبأخذ η , ε فى الحسبان نستطيع الحصول على مقدار قوة الجر ، باعتبار أن القوة المنقولة من المحرك بالكيلو وات P_m إلى عجلتى القيادة تكون بالكفاءة η ، نتيجة لوجود صندوق التروس ، ووضع القدرة بدلالة عزم الدوران على النحو الآتى :

$$T_m = 974 \frac{P_m}{n_m} \quad , P_m = \frac{T_m \; n_m}{973} \quad , T_m = f' \times r$$

(٧ — ١)

$$T = 973 \, \eta \frac{P_m}{n} = \frac{d}{2} \times f$$

$$\therefore \quad f = \eta \frac{2\,T_m}{d} \frac{n_m}{n} = \varepsilon \, \eta \, \frac{2 \; T_m}{d} \qquad (٧ — ٢)$$

$$T = \eta \, T_m \frac{n_m}{n} = \eta \, f' \, r \times \frac{R}{r} = \eta \, f' \, R$$

$$\therefore \frac{d}{2} f = \eta \, f' \, R \quad , f = \eta f' \left(\frac{2R}{d}\right) \qquad (٧ — ٣)$$

تتوقف قيمة قوة الجر ، التى يمكن الاستفادة بها ، على الوزن الراكب فوق عجلات القيادة ، وعلى معامل الالتصاق (Coefficient of adhesion) بين عجلات القيادة والقضبان ، الذى يمكن تعريفه على النحو التالى :

$$\text{معامل الالتصاق} = \frac{\text{قوة الجر اللازمة لانزلاق العجلات}}{\text{الوزن الراكب فوق العجلات}}$$

الجدول الآتى يعطى قيمة معامل الالتصاق للجرارات الكهربية على القضبان الجافة :

السرعة ، كيلو متر فى الساعة	صفر	١٦	٣٢	٤٨	٦٤	٩٦
معامل الالتصاق	٢٥ر٠	١٨ر٠	١٤ر٠	١٢ر٠	١٠ر٠	٠٩ر٠

وإذا حدث وتلطخت القضبان بمادة شحمية ، فان هذا يؤدى إلي انخفاض معامل الالتصاق إلى حوالى ٠٨ر٠. وتبرز فى هذا المضار مزايا أخرى للجر الكهربى على الجر باستخدام القاطرات البخارية ، فبينما نجد أن مائة فى المائة من الوزن المجرور يكون راكبا فوق عجلات القيادة فى عربة يسيرها محرك كهربى خاص بها ، وأن سبعين فى المائة أوأكثر من الوزن المجرور يكون راكبا فوق عجلات القيادة فى القاطرة الكهربية ، نجد أن هذه النسبة لا تزيد على خمسين فى المائة فقط فى حالة القاطرات البخارية . وإلي جانب ذلك فان هناك من الأسباب ما يدعو الى زيادة قيمة معامل الالتصاق فى الجر الكهربى عنها فى الجر باستخدام القاطرة البخارية ، مثل اعطاء المحرك الكهربى عزم دوران ثابت القيمة ، بينما تعطى الآلة البخارية عزم دوران غير منتظم ، مما ينتج عنه الهزات الفجائية والتزلق ، كما أنه بحكم التركيب الطبيعى للآلة البخارية تكون عجلات القيادة مكدسة فى حيز ضيق ، بينما يمكن توزيعها بتوزيع المحركات على طول القطار . وهذا يعنى أن أقصى قيمة ممكنة لقوة الجر التي يمكن الحصول عليها فى حالة الجر الكهربى، تكون أكثر ارتفاعا عنها فى حالة الجر بالقاطرات البخارية .

يحدد معامل الإلتصاق قيمة النهاية العظمى للتعجيل الذى يمكن أن نحصل عليه على النحو التالى: اذا كان الوزن المجرور كله راكبا على عجلات القيادة ، بمعنى أن القاطرة تجرى بمفردها ، وباعتبار أن التعجيل يبدأ بالسرعة صفر ، فان معامل الالتصاق على حسب الجدول السابق يكون حوالى ٢٥ر٠ . فى هذه الحالة تكون أقصي قيمة لقوة الجر F_a كيلو جرام عبارة عن $0.25W$ ، حيث W هو الوزن الراكب علي عجلات القيادة بالكيلو جرام ، وتكون

الكتلة المراد تعجيلها عبارة عن $\frac{W}{g}$. فاذا كانت a هى العجلة المطلوبةمتر لكل ثانية ٢ ، نجد أن .

$$F_a = 0.25\ W = \frac{W}{g} \times a = \frac{W}{9.81} \times a$$

$$\therefore\ a = 9.81 \times 0.25 = 2.452 \quad m/sec^2 \qquad (٧ - ٤)$$

$$= 35.3 \times 0.25 = 8.82 \quad Km/h/\ sec$$

$$[\ 1m/sec = 3.6\ Km/h\ ]$$

وفى العادة يكون ثلث الوزن المجرور فقط راكبا فوق عجلات القيادة ، مما يعنى أننا نحصل على ثلث هـذه القيمة فقط ، أى حوالى ٨٨ر٠ متر/ثانية٢ (يساوى ٩٤٣ر٢ كيلو متر / ساعة / ثانية) فى الحياة العملية . هـذا ويمكن الحصول على تقصير فى أثناء الفرمـلة اكبر من ذلك بكثير ، وقد تصل قيمته إلى حوالى ٥ كيلو متر / ساعة / ثانية ، حيث أنه يمكن تركيب الفرامل على جميع العجلات .

إذا أثرت قوة جر مقدارها F_a كيلو جرام على كتلة وزنها W كيلوجرام فان قيمة العجلة a الناتجة تتحدد من المعادلة :

$$F_a = \frac{W}{g}\ a \rightarrow a = \frac{9.81 \times F_a}{W} \quad m/sec^2$$

$$a = 35.3\ \frac{F_a}{W}\ \ Km/h/sec \qquad (٧ - ٥)$$

إن القاطرة الكهربية هى وسيلة التحريك الكهربية التي تسير القطار ، وعندما يتحرك القطار فان هناك كتل تتحرك حركة خطية ، وهناك أيضا

كتل تتحرك حركة دورانية . وتكمن فى هــذه الكتل كلها طاقة حركة اكتسبتها من عمود إدارة المحرك . ويمكن في هذه الحالة حساب عزم الحدافة الكلى المكافيء $(GD^2)_d$ منسوبا إلى عمود إدارة المحرك ، باستخـدام المعادلة (١٧ ـ ٦) ، لايجاد العلاقات المختلفة ،على أساس عزم دوران معين للمحرك، كما سبقت دراسته في وسائل التحريك الكهربية . ونظرا لأننا نهتم فى المرحلة الحالية بالحركة الخطية ، لدراسة حركة القطار، فان العجلة a المعطاة بالمعادلة (٥ ـ ٧) ، من أهم المعلومات التى نحتاج إليها فى هـذا الشأن ، وهى العجلة الناشئة عن قوة الجر F_a ، التي ترتبط بعزم دوران المحرك T_m ، المبذول على عمود إدارته بالمعادلة (٢ ـ ٧) ، عندما نعتبر أن $f = F_a$. ويلاحظ أن دور W فى حالة حركتنا الخطية هذه يقابل دور $(GD^2)_d$ فى حالة الحركـة الدورانية السابق دراستها. وهذا يعنى أن W يجب أن تمثل عزم القصور الذاتى المكافىء لكل من الكتل المتحركة خطيا ، والكتل التى تتحرك دورانيا ، إذا راعينا أن القطار المتحرك بفعل قوة الجر F_a يحتوى على النوعين معا . وفى الحياة العملية يمكـن الحصول على الوزن المكافيء بالكيلو جرام W_e ، الذى يمثل عـزم القصور الذاتى الكلى المكافىء للقطار المتحرك ، باضافة من ١٠٪ إلى ٢٠٪ إلى الوزن الميت W كيلو جرام (dead weight) للقطار . وبذلك تصبح المعادلة (٥ ـ ٧) :

$$F_a = \frac{W_e}{9.81} \text{ a Kg} , \quad a = 9.81 \frac{F_a}{W_e} \text{ m/sec}^2$$

$$a = 35.3 \frac{F_a}{W_e} \text{ Km/h/sec} \qquad (٧-٦)$$

تمثل F_a قوة الجر التى نحتاج اليها لاكساب العجلة a ، وهى لازمـة فى المرحلة الاولى لبداية الحركة ، حتى يصل القطار الى السرعة المطلوبة. نحتاج علاوة على ذلك الى قوة جر F_r للتغلب على قوة المقاومة التي يمكن أن تواجه

القطار فى خلال حركته ، وهى تعطى عادة كنسبة قيمتها r من وزن القطار ، حيث يطلق على r اسم المقاومة النوعية للقطار (specific train resistance) ، وتكون عادة دالة للسرعة :

$$F_r = r \times W \qquad (٧-٧)$$

واذا كان القطار يصعد منحدرا يرتفع عن المستوى الافقى بالنسبة C [تمثل النسبة C مقدار الارتفاع عن المستوى الافقى الى المسافة التى يصعدها على المنحدر نفسه ، أى جيب زاوية ميل المنحدر على المستوى الافقى ، وتوصف بانها مقدار الانحدار (gradient)]، فلابد من توافر قوة جر F_c للتغلب على مركبة الوزن CW ، التى تجر القطار الى أسفل المنحدر . وعندما يكون القطار هابطا المنحدر فان CW تساعد قوة الجر التى تبذلها المحركات ، لذلك تحتسب باشارة سالبة ، وعلى هذا الأساس نجد أن قوة الجر الكلية f بالكيلو جرام اللازم بذلها عموما لتحريك القطار بالعجلة المنتظمة a متر لكل ثانية² عبارة عن:

$$f = F_a + F_r \pm F_c = 0.102 \text{ a } W_e + W_r \pm 1000 \text{ CW Kg}$$

(٧-٨)

تعطى a عادة بالكيلو متر في الساعة لكل ثانية ، وهذا هو الشكل العملى للتعبير عن العجلة فى هذه الحالة ، لأنه يبين لنا مقدار الزيادة فى السرعة معبرا عنها بالكيلومتر لكل ساعة فى الثانية الواحدة ، كما أن W_e و W تعطيان بالطن ، ويعبر عن قيمة المقاومة r بالكيلو جرام لكل طن ، وعن قيمة الانحدار C بالنسبة المئوية ، فتصبح المعادلة (٧-٨) :

$$f = 28.3 \text{ a } W_e + W \text{ r} + 10 \text{ CW} \quad \text{Kg} \qquad (٧-٩)$$

وذلك على أساس أن وزن القطار بالطن ، والمقاومة r بالكيلو جرام لكل طن و C هى النسبة المئوية للانحدار .

عندما يتحرك القطار بسرعة v كيلو متر/ الساعة بقوة الجر f كيلو جرام ، فانه يحتاج الى القدرة P كيلووات ، حيث نجد أن : .

$$P = 9.81\ f \times v \times \frac{1000}{3600} \times 10^{-3}\ KW$$

$$= 0.00273\ f\ v\ KW \qquad (٧-١٠)$$

مثـال (١) :

a motor-Coach train weighing 240 tons is accelerated up a gradient of 1 in 250 at a mean acceleration of 2 Km.p.h./sec up to a speed of 50 Km.p.h. Find the required tractive effort in this case and the power output to the driving wheel axles at the end of the accelerating period, provided the train resistance is 5 Kg per ton and the effective weight is 10% more than the dead weight.

نجد فى هذه الحالة ، عند استخدام المعادلة (٩ - ٧) أن :

$a = 2$ Km.p.h./sec $\quad W = 240\ t\ .\ W_e = 1.1 \times 240$

$We = 264$ tons

$a = 5$ Kg/tons $\quad$ and $C = \frac{1}{250} \times 100 = 0.4$

$$\therefore f = 28.3 \times 2 \times 264 + 240 \times 5 + 0.4 \times .40 \times 10$$

$$= 17210\ Kgs$$

فى نهاية فترة التعجيل نجد أن القدرة المستفاد بها على عمود ادارة عجلات القيادة ، على حسب المعادلة (١٠ - ٧) عبارة عن :

$$P = 0.00273 \times 17210 \times 50 = 2350\ KW$$

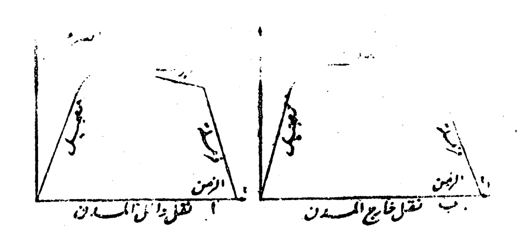
(٥ – ٧) منحنى السرعة مع الزمن : (Speed - time curve)

يمكن اعطاء كل المعلومات الاساسية ، الخاصة بتحرك القطار ، من خلال معرفة منحنى واحد ، وهو المنحنى الذى يربط بين السرعة والزمن لحركة القطار فى نطاق معين ، يحدد عادة بالتوقف عند محطتين متتاليتين . فالسرعة التى يسير بها القطار عند لحظة معينة يمكن قراءتها من المنحنى مباشرة ، والعجلة التي تتغير بها هذه السرعة ، عند نفس اللحظة ، يمكن حسابها بمعرفة ميل المماس للمنحنى عند النقطة المحددة عليه بهذه اللحظة ، كما أن المسافة التي يقطعها القطار بين لحظتين متتاليتين ، تمثلها المساحة التى يحصرها المنحنى مع محور الزمن بين احداثى السرعتين عند هاتين اللحظتين . ويبدأ منحنى السرعة مع الزمن بالاحداثيين صفر للسرعة وصفر للزمن ، وهى النقطة التى تمثل بدء تحرك القطار مغادرا إحدى المحطات ، وينتهي المنحنى بالأحداثيين صفر للسرعة ومقدار الثوانى أو الدقائق للزمن الذى يقطع فيه القطار المسافة بين محطتين ، وهذه هى النقطة التي تمثل توقف القطار عند وصوله إلى المحطة التالية . وتتكرر نفس العملية بنفس الشكل تقريبا بين المحطات المتتالية ، مما يجعلنا نكتفى بدراسة المنحنى الذى يمثل الحركة بين محطتين متتاليتين ، ولمرة واحدة فقط .

هذا ويمكن تقسيم منحنى السرعة مع الزمن الى أربعة مراحل متتالية ، تمر بها الحركة بين كل محطتين ، سواء كان القطار يسير داخل المدينة ، أو يربط بين المدن المختلفة ، باعتبار أن كل مدينة محطة وقوف . ويكون الاختلاف فى مراحل الحركة ، بين داخل المدينة وخارجها ، فى المدة التى تستغرقها كل مرحلة ، ونسبتها الى مقدار المدة الكلية بين الوقفتين .

يبدأ القطار حركته من السكون بالتعجيل المناسب ، الذى لايسبب ازعاجا للراكبين ، وبحيث يصل الى سرعة معينة ، تتوقف على قدرة المحرك والزمن المحدد لقطع المسافة بين المحطتين ، وتسمى الفترة التي تمضي بين بدء الحركة

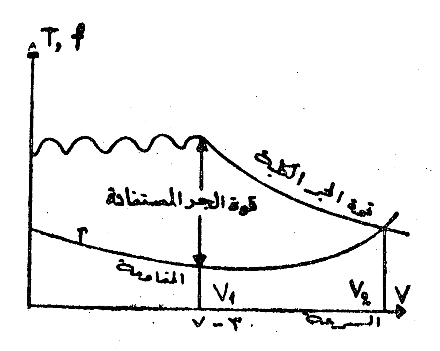
والوصول الى السرعة المطلوبة باسم فترة التعجيل (acceleration period). تمضى بعد ذلك فترة تدعى بالانطلاق الحر (free running)، حيث يسير القطار بسرعة منتظمة بالقيمة التى وصل اليها فى نهاية فترة التعجيل. وهذه الفترة تستغرق معظم الوقت بين المحطتين، بالنسبة للحركة خارج المدن، ولكنها تكون قصيرة عادة، ويمكن أن تختفى تماما بالنسبة للحركة داخل المدن وعندما تفصل المحركات عن الينبوع تبدأ فترة الارساء (Coasting)، فيكون تحرك القطار ناشئا عن القصور الذاتى، بفعل طاقة الحركة التي اكتسبها فى خلال المراحل السابقة، وتبدأ سرعته فى الانخفاض نتيجة للمقاومة التى يلقاها فى أثناء ذلك وبعد أن تنخفض سرعة القطار الى مستوى معين فى فترة الارساء تبدأ فترة الفرمل (Braking period)، فتعمل الفرامل (كهربية أو ميكانيكية أو احداهما بعد الأخرى) على ايقاف القطار فى اللحظة المناسبة عند المحطة التالية. يبين شكلا (٢ - ٧) ا، ب منحنى السرعة مع الزمن بشكله التقليدى فى حالتى النقل داخل المدن وخارجها، حيث يلاحظ أن فترة الانطلاق الحر غير موجودة فى المنحنى الخاص بالنقل داخل المدينة، كما سبقت الاشارة اليه كما يلاحظ أن فترة التعجيل تنقسم الى مرحلتين، يكون التعجيل فى الأولى منها



(شكل ٧ - ٢)

ثابت، حيث نجد أن العلاقة بين السرعة والزمن خطية، وفى المرحلة الثانية يتناقص التعجيل تدريجيا حتى تصل قيمته الى الصفر، لكى يصبح القطار سائرا بسرعة منتظمة، أو لكى تبدأ فترة الارساء. لذلك نجد أن العلاقة بين

السرعة والزمن فى هذه المرحـلة تمثل بمنحنى يكون المماس له افقيا عند النقطة التى تمثل نهاية فترة التعجيل ، بما يعنى أن قيمة العجلة قد وصلت الى الصفر عند هذه النقطة . وفى المرحلة التى يكون التعجيل فيها منتظما أو ثابت القيمة يجب أن تكون F_a ، وهى المركبة فى قوة الجر اللازمة لإعطاء هذا التعجيل، ثابتة القيمة أيضا . فبالنسبة للمحركات التى تستخدم فيها مقاومة فى أثناء فـترة البدء،نجد أن قيمة تيار البدء تتراوح بـين نهايتين ، عظمى وصغرى ، نجعلهما متقاربتين على قدر الإمكان ، وذلك بقطع مقاومة البدء من الدائرة بانتظام ، على فترات ، على حسب التدرج فى زيادة القوة الدافعـة الكهربية المضادة المتولدة فى ملفات المنتج بازدياد سرعة المحرك . ونظرا لأن قيمة عزم الدوران فى هذه المحركات تتناسب مع شدة التيار ، حيث تحتفظ بشدة المجال ثابتة فى مثل هـــذه الاحوال ، فان قيمة عزم الدوران ، الذى يبذله المحرك فى خلال فـترة البدء ، تتراوح بين قيمتين متقاربتين ، باعتبار قيمة ثابتة متوسطة بينهما لاتختلف عن أى منهما الا اختلافا ضئيلا ، كما هو مبين فى شكل (٣ ـ ٧) ، مابين السرعتين صفر ، v_1 . وشكل (٣ ـ ٧) هـذا



شكل (٣ ـ ٧)

يبين العلاقة بين كل من السرعة كمتغير أصلى ، وبين كل من قوة الجر الكلية التى يبذلها المحرك ، متناسبة مع عزم الدوران ، والمقاومة التى يلقاها القطار فى أثناء الحركة ، والفرق بينهما ، الذى هو عبارة عن قوة الجر المستفاد بها فى تحريك القطار ، كدالة للسرعة . وعند السرعة v_1 تكون مقاومة البدء قد خرجت نهائيا من دائرة المحرك ، ولكن المحرك لم يصل إلى سرعته المعتادة بعد ، بمعنى أن القوة الدافعة الكهربية المضادة لم تصل إلى كامل قيمتها بعد . وفى خلال زيادة قيمة السرعة من v_1 إلى v_2 ، وهى السرعة النهائية المقصودة ، تزداد قيمة القوة الدافعة الكهربية المضادة ، فتقل قيمة التيار (ضغط الينبوع V ثابت ، $V = E + I R_a$ ، حيث R_a مقاومة المنتج ثابتة أيضا) ، مما يؤدى إلى انخفاض قيمة عزم دوران المحرك تدريجيا ، وبالتالى قوة الجر الكلية التى يبذلها لتحريك القطار . ونظرا لأن القطار سوف ينطلق حرا بالسرعة الثابتة v_2 ، لذلك نجد أن الأمور مرتبة بحيث تصبح قوة الجر الكلية f_2 ، التى يبذلها المحرك عند هذه السرعة ، تساوى قوة الجر المكافئة لما يلقاه القطار من مقاومات لحركته (بما فى ذلك مركبة الوزن إذا كان يصعد منحدرا) ، حيث تصبح قيمة العجلة صفرا وبالتالى F_a تساوى صفرا . هذا ، ويؤدى تناقص قيمة العجلة بين v_1 ، v_2 ، تمهيدا لتثبيت قيمة السرعة عند v_2 ، إلى تناقص فى قيمة F_a المطلوبة ، مما يتمشى مع هبوط قيمة التيار ، التى تتسبب فى انخفاض قيمة قوة الجر الكلية التى يبذلها المحرك بين هاتين السرعتين ، كما سبق ذكره ، وكما هو مبين فى شكل (٣ - ٧) ، حيث يلاحظ أن مقاومة القطار تنخفض قليلا مع زيادة السرعة ، ثم تزداد معها بعد ذلك باطراد .

ويمكننا بمعرفة منحنى قوة الجر مع السرعة للمحرك ، وكذلك منحنى مقاومة القطار مع السرعة السابق بيانهما فى شكل (٣ - ٧) أن نحصل على منحنى السرعة مع الزمن ، وبالتالى المسافة التى يقطعها القطار مع الزمن ، كما سنوضح فيما بعد . توجد فى منحنى السرعة مع الزمن ثلاث سرعات ذات أهمية خاصة ، الا وهى :

ا — السرعة القصوى (crest speed) ، وهذه أقصى سرعة يصل اليها القطار فى خلال رحلاته .

ب — السرعة المتوسطة (average speed) ، وهى عبارة عن متوسط قيمة السرعة بين البدء والوقوف .

حـ — السرعة الحسابية (schedule speed) ، وهى السرعة المتوسطة بين الوقفتين ، أى مع أخذ فترة الوقوف فى الحساب .

(٦ – ٧) منحنى شبه المنحرف للسرعة مع الزمن :

(Trapezoidal speed/time curve)

لسهولة الحساب ، مع عدم الوقوع في خطأ يذكر ، يمكننا تقريب منحنى السرعة مع الزمن إلى شبه منحرف ، قد يكون ثابت الارتفاع أو متغيره ، كما هو مبين فى شكل (٤ – ٧ ا ، ب) بالنسبة للحركة داخل المدينة ، كما أنه يكون ثابت الارتفاع ، كما هو مبين في شكل (٤ – ٧ حـ) بالنسبة للسفر بين المدن . فى هذه الحالة ، وباعتبار شبه منحرف ثابت الارتفاع نجد أن الحركة تنقسم إلى ثلاث مراحل مبسطة كما هو مبين فى شكل (٤ – ٧) :

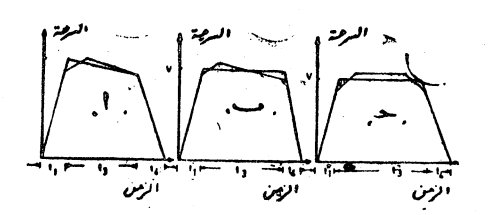
ا — فى الفترة الزمنية t_1 ثانية ، وهى فترة التعجيل ، ترتفع السرعة بانتظام ، بالعجلة المنتظمة a كيلومتر فى الساعة لكل ثانية ، من الصفر إلى v كيلو متر في الساعة ويقطع القطار المافة S_1 كيلومتر ، حيث نجد أن :

$$t_1 = \frac{v}{a} \text{ secs} , \quad S_1 = \frac{1}{2} \frac{v}{3600} t_1 = \frac{v^2}{7200 \text{ a}} \text{ Km}$$

(٧ – ١١)

ب — في الفترة الزمنية t_4 ثانية ، وهي فترة الفرملة ، تنخفض سرعة

القطار بانتظام ، بعجلة التقصير المنتظمة b كيلومتر فى الساعة لكل ثانية ، ويقطع القطار المسافة S_4 كيلومتر ، حيث نجد أن :



شكل (٤ – ٧)

$$t_4 = \frac{v}{b} \text{ secs} \quad , S_4 = \frac{1}{2} \frac{v}{3600} t_4 = \frac{v^2}{7200\ b} \text{ Km}$$

(٧ – ١٢)

حـ – فى الفترة الزمنية المتوسطة t_3 ثانية يسير القطار المسافة S_3 كيلو متر بالسرعة المنتظمة v كيلومتر فى الساعة ، ويمكننا حساب قيمة t_3 بدلالة زمن الرحلة الكلى بين البدء والوقوف T ثانية ، حيث نجد أن :

$$t_3 = T - (t_1 + t_4) = T - \left(\frac{v}{a} + \frac{v}{b} \right)$$

$$S_3 = \frac{v}{3600} t_3 = \frac{v}{3600} \left[T - \frac{v}{a} - \frac{v}{b} \right] \text{ Km}$$

(٧ – ١٣)

باستخدام المعادلات (١١ – ٧) إلى (١٣ – ٧) لإيجاد المسافة الكلية بين المحطتين S كيلومتر نجد أن :

$$S = S_1 + S_3 + S_4$$

$$= \frac{v^2}{7200\ a} + \frac{v^2}{7200\ b} + \frac{v}{3600} T - \frac{v^2}{3600\ a} - \frac{v^2}{3600\ b}$$

$$\therefore\ v^2 \left(\frac{1}{7200\ a} + \frac{1}{7200\ b} \right) - v \frac{T}{3600} + S = o$$

$$\Theta\ v^2 - v.T + 3600\ S = o \qquad (١٤-٧)أ$$

$$\Theta = \frac{1}{2a} + \frac{1}{2b} = \frac{(a+b)}{2\ a\ b} \qquad (١٤-٧)ب$$

المعادلة (١٤ – ٧) ا من الدرجة الثانية فى المسافة S بالكيلومتر ، وحلها هـــو .

$$v = \frac{T}{2\Theta} \pm \frac{\sqrt{T^2 - 4 \times 3600\ \Theta S}}{2\,\Theta}$$

$$= \frac{1}{2\Theta} \left[T - \sqrt{T^2 - 14400\ \Theta S} \right] \text{Km/h}$$

(٧ – ١٥)

أهملنا الاشارة الموجبة لانها تعطى اجابة خاطئة ، حيث أن السرعة v ، باعتبار ما سبق ، يجب أن تكون أقل من القيمة $\frac{T}{2\theta}$.

(٧ – ٧) تأثير السرعة الحسابية على كل من التعجيل والفرملة والمسافة :

نلاحظ أن المعادلة (١٥ – ٧) تعطى قيمة أقصى سرعة يمكن أن يصل إليها القطار فى أثناء المرحلة بين محطتين ، على أساس زمن معين T ثانية تقطع فيه المسافـة الكلية S كيلومتر بـين المحطتين ، مع استخدام القيمتين a , b كيلومتر فى الساعة لكل ثانية فى التعجيل والتقصير على التوالى . وبتحديد زمن معين لوقوف القطار فى المحطات يمكن معرفة قيمة السرعة الحسابية ، أو يمكن بالعكس تحديد قيمة أقصى سرعة، أو التعجيل الـلازم للحصول على سرعة حسابية معينة على خط معلوم ، كما يتبين من المثال التالى :

مثال محلول :

a train maintains a schedule speed of 40 Km/hr between two stations, which are 2.5 Km apart, when it makes a stop of 25 seconds at each station. The train accelerates at 2.2 Km/h/sec and brakes at 3.5 Km/h/sec. Calculate the value of the maximum speed which the train should attain during the run assuming a trapezoidal sdeed/time curve. Draw the corresponding speed-time curve.

تتراوح قيمتا التعجيل والتقصير ، بما يتناسب مع راحة المسافرين عادة ، في حدود معلومة لهذا الغرض . وبتحديد السرعة الحسابية ، مع زمن الوقوف بالمحطات، يمكن تحديد زمن الرحلة T ،الذى ينظم حركة القطارات على الخط . ومن ثم تتحدد السرعة القصوى ، التى يجب ألا تزيد عن حـــد معين ، تبعا لدواعى الأمن وتعليمات المرور ، وإلا وجب تعديل قيمة السرعة الحسابية للحصول على السرعة القصوى المناسبة . ففى المثال المعطى نجد أن :

التعجيل : $a = 2.2$ Km/h/sec

التقصير : $b = 3.2$ Km/h/sec

وهما قيمتان لا تجعلان المسافرين يشعرون بقلقـــلة فى أماكنهم بسبب التغيرات الفجائية فى الحركة .

$$\text{زمن الرحلة } T + \text{ زمن الوقوف فى المحطة } t = \frac{\text{المسافة بين المحطتين}}{\text{السرعة الحسابية}}$$

$$t + T = \frac{2.5}{40} = 0.0625 \text{ hr} = 3.75 \text{ min} = 225 \text{ sec}$$

$$T = 225 - 25 = 200 \text{ sec.}$$

$$\Theta = \frac{a + b}{2a\ b} = \frac{2.2 + 3.5}{2 \times 2.2 \times 3.5} = \frac{5.4}{4.4 \times 3.5}$$

$$= 0.37 \quad sec.Km/h$$

السرعة القصوى :

$$v = \frac{1}{0.74}\left[200 - \sqrt{(2(0)^2 - 14400 \times 0,37 \times 2.5}\right]$$

$$= 49.3 \quad Km/h$$

لكى نرسم منحنى السرعة مع الزمن يجب حساب كل من t_4 ، t_3 ، t_1 . كما هى مبينة على شكل(٤ ـ٧)حـ ، ومن ثم يمكن رسم المنحنى المطلوب ، د فى الشكل .

$$t_1 = \frac{v}{a} = \frac{49.3}{2.2} = 22.4 \quad secs$$

$$t_4 = \frac{v}{b} = \frac{49.3}{3.5} = 14.1 \quad secs$$

$$t_3 = 200 - (14.1 + 22.4) = 163.5 \quad secs.$$

٧ ـ) حساب منحنى السرعة مع الزمن :

يمكننا حساب العجلة a بمعرفة قيمة القوة المعجلة F_a والوزن المكافى للقطار W_e باستخدام المعادلة (٦ ـ ٧) . وتتوفر لنا المعلومات اللازمة لحساب قيمة F_a بالمعادلة (٩ ـ ٧) من منحنى قوة الجر ومقاومة القطار ، المعطيان فى شكل (٣ ـ ٧) .

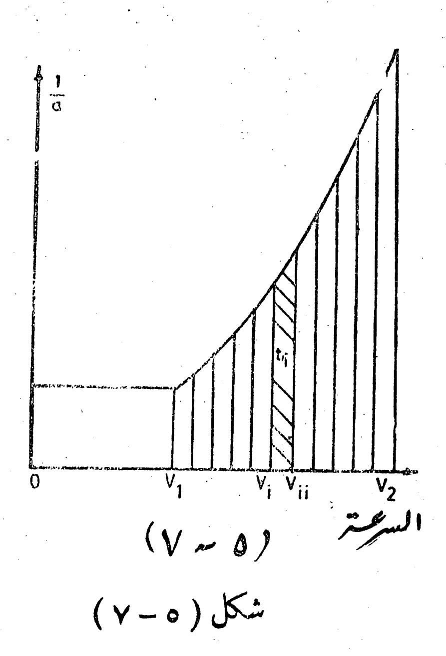
$$F_a = 28.3 \quad aW_e = f - F_r - 10\,CW$$

$$a = \frac{1}{28.3\ W_e}\left[f - F_r - 10\,CW\right] \qquad (٧-١٦)$$

يمكننا بعد ذلك الحصول على الزمن كدالة السرعة من العلاقات الميكانيكية البسيطة ، حيث :

$$a = \frac{dv}{dt} \quad , dt = \frac{dv}{a} \quad , t = \int \frac{1}{a}\, dv \qquad (٧ - ١٧)$$

وبذلك نستطيع أن نرسم منحنى السرعة مع الزمن ، مع مراعاة تغيير الاحداثيات ، بجعل الزمن على المحور الافقي والسرعة على المحور الرأسي لتسهيل محاكاة الطرق الحسابية المعطاة سابقا . ونلاحظ أن التكامل الذى يعطى الزمن كدالة للسرعة ، كما حصلنا عليه فى المعادلة (١٧ - ٧) ، لا يمكن اجراؤه إلا إذا تيسرت لنا معرفة العجلة a كدالة للسرعة ، وهو ما يتعذر فى كثير من الاحيان . لذلك نلجأ إلى الحل باستخدام الطريقة البيانية (graphical method) على نفس المنوال الذى سبق شرحه، بالنسبة لإيجاد زمن البدء والفرملة فى باب وسائل التحريك الكهربى ، باتباع الخطوات الآتية : باللجوء إلى شكل (٣ - ٧) نحصل على العجلة عند السرعات المختلفة v_1 , v_2 , v_3 ... الخ



شكل (٥ - ٧)

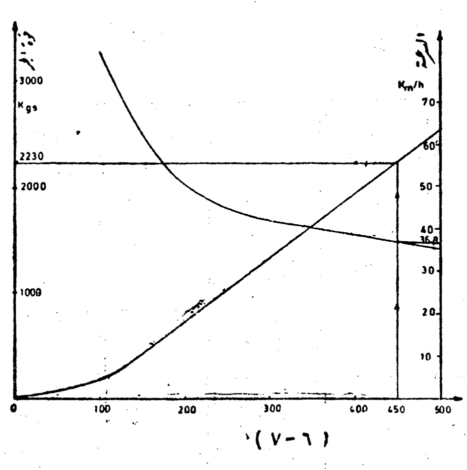
باستخدام المعادلة (١٦ ـ ٧) ، ثم نرسم منحنى يربط بين $\frac{1}{a}$ كدالة للسرعة v كما هو ممثل فى شكل (٥ ـ ٧) ، حيث نجد أن قيمة $\frac{1}{a}$ ثابتة من صفر حتى v_1 ، وذلك لان a ثابتة بين هذين الحدين ، ثم تزداد قيمة $\frac{1}{a}$ على أساس أن تبلغ مالانهاية عند v_2 ، لأن قيمة a تساوى الصفر عند هذه السرعة . بتقسيم المساحة تحت المنحنى إلى أكبر عدد ممكن من اشباه المنحرفات (أو المستطيلات)، يمكننا أن نحصل على الزمن t_i اللازم لتغير السرعة من قيمة معينة v_i إلى القيمة التى تليها v_{ii} ، كما هو موضح بالشكل ، بحساب مقدار ما تمثله المساحة المحددة بقاعدتى شبه المنحرف ، عند هاتين السرعتين ، كاحداثيين . وهذا هو التطبيق البيانى لحل المعادلة (١٧ ـ ٧) ، حيث تمثل المساحة المحددة المحسوبة بالتكامل $\int_{v_i}^{v_{ii}} \frac{1}{a}\, dv$. وبتجميع هذه المساحات يمكن معرفة الزمن اللازم للوصول إلى أية سرعة علي المنحنى الأصلي فى شكل (٣ ـ ٧) ، وبذلك يمكن رسم منحنى السرعة مع الزمن ، كما يتضح من المثال الآتى :

مثال محلول :

a train of total weight 130 tons is equipped with 4 motors each rated 300 HP: The following table gives the motor and train resistance characteristics.

Current (amps.)	100	200	300	400	500
Speed (Km/h)	82	50.5	42.5	38.5	35.5
Tractive effort (Kg)	174	714	1322	1935	2540
Train resistance (Kg/ton)	5	4.5	4	4	4.5

The effective weight can be assumed 1.1 times the dead weight. The mean value of the motor current in the acceleration period is 450 Amps and the braking retardation is made at a rate of 3.5 Km/h/sec. The distance between the two stations of 1.4 Km runs with an up grade of 0.12 per cent and has to be cut in 130 secs. Calculate the value of the r.m.s. current taken by each motor for the run.



شكل (٦ – ٧)

يبين شكل (٦ – ٧) منحنى السرعة كدالة للتيار، ومنحنى قوة الجـر كدار للتيار أيضا، ونظرا لأن متوسط قيمة التيار فى خلال فـترة التعجيل تبلغ حوالى ٤٥٠ أمبير في كل محرك، فان قوة الجر التي يبذلها كل محرك، كما يعطيها المنحنى هى ٢٢٣٠ كيلوجرام، وهى تظل فعالة حتى تصل السرعة إلى ٣٦٫٨ كيلومتر فى الساعة، وذلك بالعجلة المنتظمة a كيلومتر فى الساعـة لكل ثانية. وتكون مركبة قوة الجر 10 CW اللازمة للتغلب على مركبـة وزن القطار بسبب صعود المنحدر عبارة عن $10 \times 130 \times 0.12 = 156$ كيلوجرام. الوزن الفعـال للقطار عبارة عن $143 = 1.1 \times 130$ طن. لـكى يمكننا رسم منحنى السرعة مع الزمن نقوم أولا بحساب قيم العجلة a

(ثم $\frac{1}{a}$) عند السرعات المعطاة وذلك بايجاد قيمة F_a عند كل سرعة منها باستخدام المعادلة (١٦ – ٧) فى كل مرة ، ووضع النتائج في جدول على النحو التالي :

$$a = \frac{F_a}{28.3\ W_e} = \frac{(f - F_r - 10\,CW)}{28.3 \times 143}$$

$$= \frac{(f - F_r - 156)}{4045} \quad Km/h/sec$$

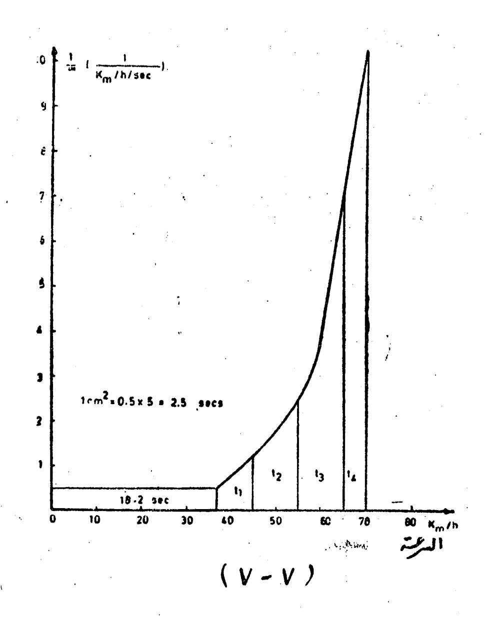
v Km/h	< 36.8	40	45	50	60	70	80
f K_{gs}	8920	6720	4240	2880	1840	1200	760
F_r	585	520	520	585	585	650	650
10 CW			156				
F_a	8179	6044	3564	2139	1099	394	— 46
a	2.02	1.495	0.883	0.529	0.272	.0975	0.0114
$\frac{1}{a}$	0.495	0.736	1.135	1.929	3.68	10 25	−87.75

نحافظ على قيمة التيار ثابتة تقريبا فى أثناء البدء بتقليل المقاومة تدريجيا ، فنحصل على قوة جر وبالتالى تعجيل ثابت القيمة مقداره ٢٫٠٢ كيلومتر في الساعة لكل ثانية، حتى تصل السرعة إلى ٣٦٫٨ كيلومتر فى الساعة . ويكون الزمن اللازم لذلك ، وهو زمن فترة التعجيل الذى تزداد فيه السرعة خطيا ، عبارة عن :

$$t_1 = \frac{v}{a} = \frac{36.8}{2.02} = 18.2 \quad secs$$

وتمثل مساحة المستطيل، فى الجزء الأول من منحنى $\frac{1}{a}$ مع السرعة، هذه القيمة ، باعتبار أن كل سم^{٢} فى الرسم $2.5 = 5 \times 0.5$ ثانية ،

تصل السرعة إلى ٤٥ كيلومتر فى الساعة بعد زمن مقداره $t_1 + 18.2$ ثانية ، ونحصل على t_1 بعد المربعات تحت المنحنى بين الاحداثين عند السرعتين ٣٩٫٨ و ٤٥ كيلو متر فى الساعة ، وفيما يلى منتائج كما يعطيها شكل (٧ – ٧) .



شكل (٧ – ٧)

$t_1 = 2.32 \times 2.5 = 5.8$ secs.

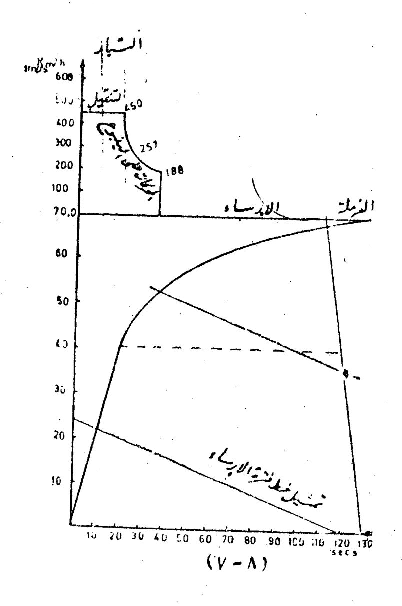
$t_2 = 7.335 \times 2.5 = 18,35$ secs.

$t_3 = 16,6 \times 2,5 = 41,5$ secs,

$t_4 = 17 \times 2.5 = 42.5$ secs,

v Km/h	O	36.8	45	55	65	70
t secs,	O	18.2	24	42.35	83.85	126.85

حدد الزمن الكلى بـ ١٣٠ ثانية (على أساس تنظيم حركة القطارات)، كما حددت عجلة التقصير فى أثناء الفرملة بـ ٣٫٥ كيلومتر فى الساعة لكل ثانيـة (على أساس إراحة الركاب لكى لاتصيبهم رجات) ، وبذلك يمكننا رسم الجزء الخاص بفترة الفرملة من المنحنى،وهوعبارة عن خط مستقيم يقطع منحنى الزمن عند اللحظة ١٣٠ ثانية،ويميل عليه بالقيمة ٣٫٥ كيلومتر فى الساعة لكل ثانية ، فيمر باللحظة ١٢٠ ثانية عندما تكون السرعة (١٣٠ – ١٢٠) × ٣٫٥ = ٣٥ كيلومتر فى الساعـة . ونظرا لقصر المسافة بين المحطتين ، فلن تكون هناك فترة للانطلاق الحر،وانما توجد فترة إرساء فقط تتحدد على أساس



(شكل ٨ – ٧)

أن القطار يبدأ فى تهدئة سرعته القصوى التى وصل إليها تحت تأثير مقاومة الحركة التى يلقاها ، وبفعل مركبة الوزن الناشئة عن وجود المنحدر ، فاذا أخذنا فى الاعتبار أكبر مقاومة للحركة وهى ٦٥٠ كيلوجرام ، نجد أن عجلة التقصير b_c كيلومتر فى الساعة لكل ثانية فى هذه الفترة عبارة عن :

$$b_c = \frac{650 + 156}{28.3 \times 143} = \frac{806}{404} \simeq 0.2 \ \text{Km/h/sec.}$$

وهذا يحدد ميل الخط الذى يمثل فترة الارساء ، حيث يمكن رسمه أولا من نقطة الصفر وبهذا الميل مع منحنى الزمن، باعتبار أن السرعة تتغير بالقيمة ٢ر٠ × ٥٠ = ١٠ كيلو متر فى الساعة فى زمن مقداره خمسون ثانية ، كما هو مبين فى شكل (٨ — ٧). ويتحدد وضع خط فترة الارساء على منحنى السرعة مع الزمن برسم مواز لهـــذا الخط، بحيث تصبح المسافة التى يحصرها المنحنى بأكمله هى المسافة بين المحطتين ، وهى ٤ر١ كيلومتر المعطاة. وهـــذا يستلزم تحديد مقياس الرسم على النحو التالي

كل ١ سم على المحور الافقى تمثل ١٠ ثوانى

كل ١ سم على المحور الرأسى تمثل ٥ كيلومتر فى الساعة

كل ١ سم مربع تمثل ٥ × $\frac{١٠}{٣٦٠٠}$ = ٠١٣٩ر٠ كيلومتر

1 cm² represents 0.0139 Km

وبذلك نجد أن المسافة ٤ر١ كيلومتر يمثلها على الرسم

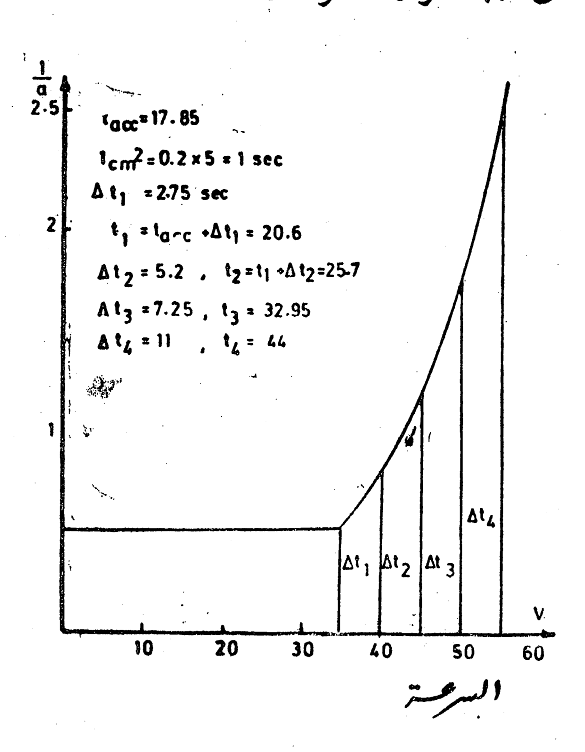
$$\frac{1.4}{0.0139} = 100.7 \ \text{cm}^2$$

ويكون تحديد خط الإرساء بأن نرتفع, تدريجيا بموازاة محور الزمن، ونعد المربعات المحصورة حتى نحصل على الرقم المطلوب للمساحة مع الخط الافقى ، ثم نعمل على تعـــديل ميل هذا الخط بحيث يصبح موازيا للخط المرسوم من قبل، وتكون المساحة المحصورة هى المساحة المطلوبة . يحدد خط الارساء فى هذه الحالة قيمة السرعة القصوى التى يصل اليها القطار ، قبل أن يفصل المحرك من الينبوع مباشرة ، وهى عبارة عن نقطة تقاطع خط فترة الارساء مع منحنى فترة التعجيل ، وتبلغ فى حالتنا هـــذه ٥ر٥٢ كيلومتر فى الساعة . كما يحدد خط الإرساء أيضا قيمة السرعة التى يصل اليها القطار لحظة بدء فترة الفرملة، وتمثلها نقطة تقـاطع خط فترة الارساء مع خط فترة الفرملة وهى عبـارة عن ٥ر٣٦ كيلومتر فى الساعة فى المسألة المعطاة.

وبذلك نجد أن المرحلة تنقسم الى : ا ــ فترة تعجيل تصل فيها السرعة الى ٥ر٥٢ كيلومتر فى الساعة ، وتستغرق ٣٦ ثانية ب ــ ثم فترة ارسـاء لمدة ٨٣ ثانية ، وتهبط فيها السرعة حتى تصل الى ٣٦ كيلو متر فى الساعة جـ ــ وأخيراً فترة الفرملة التى تستمر لمدة ١١ ثانية تقريبا فقط ، ويقف فى نهايتهـا القطار.

لـكى نحصل على القيمة الفعالة للتيار يجب علينا أولا رسم منحنى التيار مع الزمن ، وذلك بالاستعانة بمنحنى التيار مع السرعة ، والسرعة مع الزمن، كما هو مبين باعلى شكل (٨ ــ ٧). نربع بعد ذلك احداثيات التيار عن الأزمنة المختلفة لـكى نحصل على منحنى مربع التيـار مع الزمن ، الذى نستخدمه لايجاد القيمة المتوسطة لمربع التيار، كما هو مبين بشكل (٩ ــ ٧) ، حيث نجد أن القيمة المتوسطة لمربع التيار عبارة عن $3.85 \times 10^4 A^2$ ، وتكون القيمة الفعالة للتيار efftetive value أو جذر متوسط المربع (r.m.s. value)

عبارة عن $\sqrt{3.85 \times 10^4} = 196.2$ A . وهذه القيمة هى التى يتوقف عليها مدى الزيادة فى درجة حرارة المحركات.



شكل (٩ – ٧)

مثال محلول (٢) :

The following characteristics relate to each of two d.c. series traction motors rated at 208 HP with 0.94 efficiency, which are used for driving a 60 ton train, when supplied from 550 V supply:

cunrent (amps)	100	200	300	400
useful torque (Kg.m.)	46	135	240	353
Speed (r.p.m.)	1168	795	668	606

Calculate and draw the speed-time curve and find the value of the r.m.s. current per motor for the run, assuming the following data : distance between two stations covered in 100 secs, constant train resistance of 5 Kgs/ton, accelerating weight of the train 10 % greater than the dead weight, braking retardation at a rate of 3 Km.p.h./sec, maximum speed attained during the run 55 Km/h, the track runs with a down gradient of 0.1 percent: driving wheel diameter 1050 mms, gear box ratio and efficiency 1 : 3.5 and 0.95 respectively. The constant starting current taken by each motor during rheostatic acceleration equals 1.2 times its full load rated current

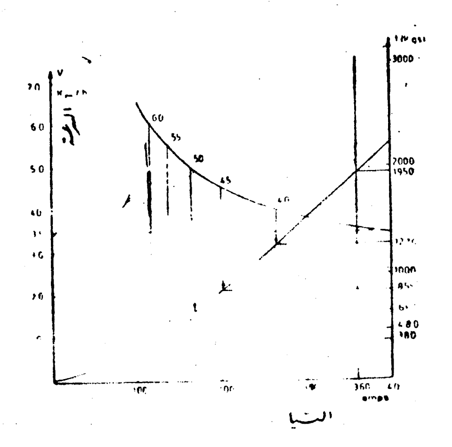
$$\text{Tractive effort} = \varepsilon\,\eta\,\frac{2\,T_m}{d}\,,\quad \varepsilon = \frac{n_m}{n} = \frac{R}{r} = 3.5$$

$$\eta = 0.95,\ d = 1.05,\ f = \frac{3.5 \times 0.95 \times 2}{1.05}\,T_m = 6.33\,T_m$$

$$v = \frac{\pi\,dn \times 60}{1000} = \frac{\pi\,d\,n_m \times 60}{1000\,\varepsilon} = 0.0566\ n_m \cdot \text{Km/h}$$

current (amps,)	100	200	300	400
speed (Km/h)	66	45	37.8	34.3
tractive effort (Kgs)	291.5	655	1520	2235

يبين شكل (١٠ ـ ٧) كل من قوة الجر والسرعة مع التيار كما حصلنا عليها فى الجدول السابق .



شكل (١٠ – ٧)

$$I_{st} = 1.2\ I_{fl} = 1.2 \times \frac{208 \times 746}{0.9 \times 550} = 360 \text{ Amps}$$

من المنحنى فى شكل (١٠ – ٧) نحصل على قوة الجر المناظرة فى خلال فترة التعجيل ، وهى عبارة عن ١٩٥٠ كيلو جرام .متر لكل محرك

$\therefore$ f (during aceleration) = 1950 × 2 = 3900 Kgs

10 CW = 10 × 0.1 × 60 Kgs

F_r = 60 × 5 = 300 Kgs

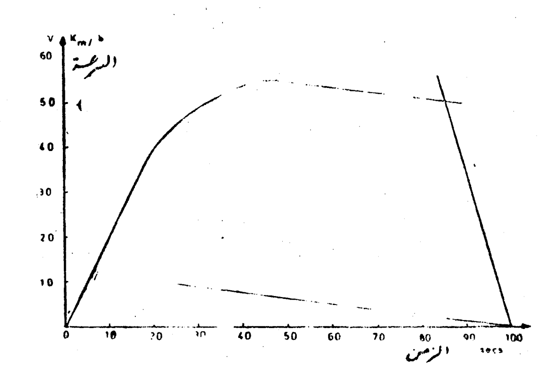
Net resistance (F_r − 10 WC) = 240 Kgs

W_e = 60 × 1.1 = 66 tons

$$\alpha = \frac{F_a}{28.3\ W_e} = \frac{(f - 240)}{1868}$$

يمكننا من المعلومات السابقة عمل الجدول الذى نحصل منه على $\frac{1}{a}$ كدالة للسرعة v على النحو التالي:

v (Km/h)	<35	40	45	50	55	60
f (Kgs)	3900	2540	1710	1320	960	760
(F_J — 10 CW)		240				
F_a	3660	2300	1470	1080	720	520
a	1.96	1.[illegible]32	0.787	0.578	0.386	0.279
$\frac{1}{a}$	0.511	0.81[illegible]	2[illegible]	1.732	2.6	3.59



شكل (١١ – ٧)

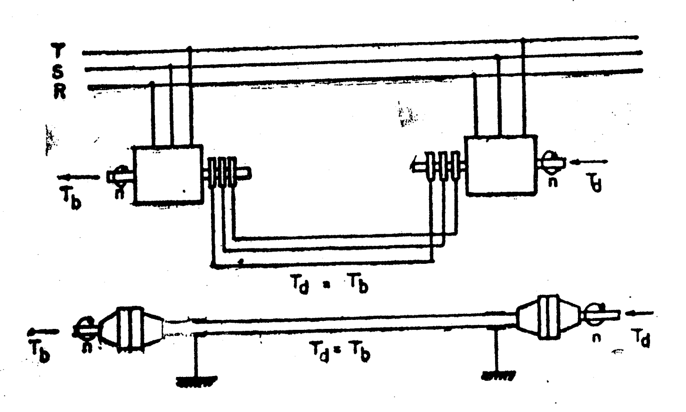
يمكن بعد ذلك رسم المنحنى الذي يربط بين السرعة ومعكوس العجلة كما فعلنا في شكل (٧ – ٧) الخاص بالمثال السابق ومتابعة الحل على نفس المنوال، ويبين شكل (١١ – ٧) منحنى السرعة مع الزمن المناظر لشكل (٨ – ٧) في المثال المذكور.

(ثانيا) عمود الادارة الكهربى (توصيلات التزامن الذاتى)

Electrical Shaft (Selsyn or selfsynchronous connections)

(٩ – ٧) تكوين عمود الإدارة الكهربى :

يطلق اسم عمود الادارة الكهربى على مجموعة مكونة من محركين تأثيريين من ذوات الحلقات الانزلاقية ، تتصل حلقاتها الانزلاقية معاً ، ويوصل عضواهما الثابتان على التوازى معاً على نفس الينبوع ، كما هو مبين فى شكل (١٢ – ٧) . وتستخدم المجموعة على هذا النحو فى نقل عزم دوران ميكانيكى



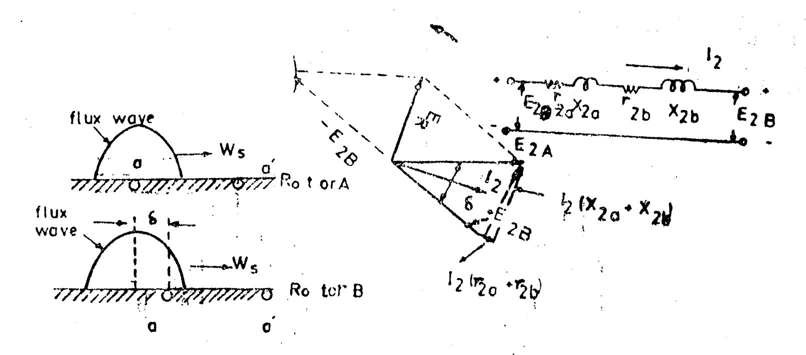
شكل (١٢ — ٧) ا

معين T_d عند سرعة معينة n (قدرة معينة) من مكان ، إلى مكان آخر بعيد بعداً يصعب معه استخدام عمود إدارة ميكانيكى عادى [مبين فى الجزء الأسفل من شكل (١٢ – ٧) ا] ، وذلك بنفس السرعة n بالضبط. ويكون عزم الدوران المنقول T_b مساويا لعزم الدوران الأصلى T_d ، إذا أهملنا مفقودات القدرة فى خلال عملية النقل.

ويطلق على توصيل المحركين بهذا الشكل اسم توصيل التزامن الذاتى ،

حيث تكون القدرة التى تسرى بين العضوين الدائرين للمحركين عبارة عن قدرة تزامن ، مثل القدرة التى تسرى بين منتجى مولدين متزامنين متصلين على التوازى (كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية صفحة ١٩٠).

عندما يكون العضوان الثابتان للمحركين متصلين مع نفس الينبوع يتولد نفس المجال المغناطيسي الدائر فى كل من المحركين ، الذى يدور بسرعة التزامن الزاوية ω_s ، كما هو مبين بموجتي المجال فى شكل (١٢ ـ ٧) ب .



شكل (١٢ ـ ٧) ب

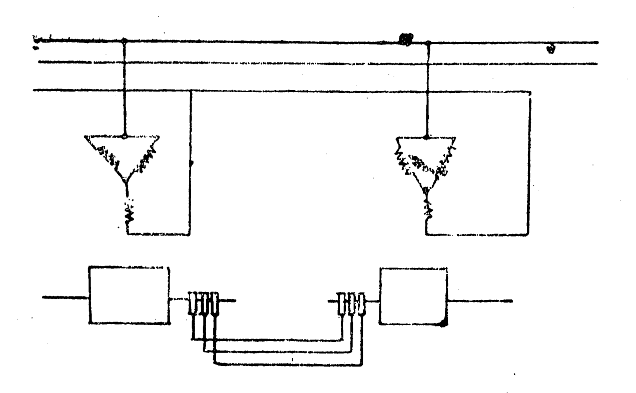
إذا لم يكن هناك أى عزم دوران دخيل على أى من عمودى الإدارة فى المحركين، فانهما يدوران بنفس السرعة وتكون القوة الدافعة الكهربية المرحلية متساوية تماما فى كل من العضوين الدائرين (نظراً للتماثل الكامل بين المحركين) ولنرمز لها بالرمز E_{2A} فى المحرك الايمن ، وبالرمز E_{2B} فى المحرك الايسر ، بحيث تصبح الدائرة المكافئة للعضوين الدائرين لكل مرحلة وهما متصلان بالتضاد معاً ، كما هو مبين فى شكل (١٢ ـ ٧) ب.

عند دخول عزم الدوران المحرك T_d على عمود إدارة المحرك الايمن بالسرعة n ، ووجود عزم الدوران الفرملى T_b على عمود إدارة المحرك الآخر ، يصبح العضو الدائر فى هذا المحرك الاخير دائراً بالسرعة n أيضاً ،

بحكم التماثل بين المحركين ، ولكن E_{2A} يكون متقدما على E_{2B} بالزاوية δ كما هو مبين فى شكل (١٢ – ٧) ب ، على أساس أن عمود الادارة الايمن عليه عزم دوران محرك وعمود الادارة الايسر عليه عزم دوران فرملى (كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية صفحة ١٩١) ، ويصبح الوضع بالنسبة لدائرتى العضوين الدائرين ، كما لو كان على الناحية اليمنى مولد متزامن ، يغذى على الناحية اليسرى محركا متزامناً ، وسرعة التزامن لهما هى n ، التى يتحتم عليهما أن يدورا بها معاً دون تغيير . على هذا النحو ينتقل عزم دوران معين عند سرعة معلومة ، من عمود ادارة المحرك الايمن الى عمود ادارة المحرك الايسر ، عن طريق سريان قدرة تزامن بين دائرتى العضوين الدائرين للمحركين .

من الواضح أنه عندما يكون التردد واحداً فى دائرتى العضوين الدائرين ، وعضواهما الثابتان متصلين إلى نفس الينبوع ، فان السرعة تكون واحدة بالضبط في كل من المحركين ، وهذا هو عين المطلوب . ويكون سريان القدرة فى هذه الحالة ، من ناحية إلى الناحية الأخرى ، عن طريق القدرة الانزلاقية (slip power) ، التى تسرى بين دائرتى العضوين الدائرين . لذلك فانه عند سرعة التزامن n_s حيث تكون الضغوط والتيارات فى دائرتى العضوين الدائرين مساوية للصفر ، لايمكن نقل أية قدرة ، وتفشل المجموعة فى أداء مهمتها .

وللتغلب على هذه الصعوبة ، نعمد الى ادارة العضو الدائر للمحرك المدار (عزم الدوران T_d) فى عكس اتجاه دوران مجاله المغناطيسى ، حيث يمكن فى هذه الحالة نقل القدرة عند سرعة التزامن n_s . واذا أردنا نقل القدرة فى كل من اتجاهى الدوران المتضادين ، فاننا نستخدم التوصيل مفرد المرحلة ، كما هو مبين فى شكل (١٣ – ٧) .



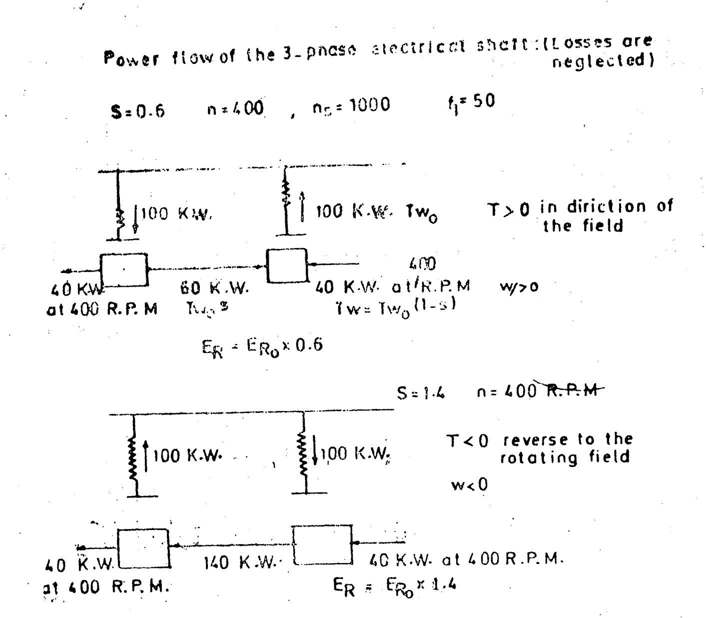
شكل (١٣ ـ ٧)

(١٠ - ٧) سريان القدرة فى عمود الادارة الكهربى ثلاثى المراحل :

نفرض أننا نريد نقل قدرة مقدارها ٤٠ كيلوات وعند السرعة ٤٠٠ لفة فى الدقيقة من مكان الى مكان آخر بعيد عنه ، بحيث يستحيل استخدام عمود ادارة ميكانيكى فى هذه الحالة . نحتاج إذا الى عمود ادارة كهربى ، وهو عبارة عن محركين تأثيريين ذواتا حلقات انزلاقية متماثلين تماما من جميع النواحى بحيث يكون توصيلهما كما سبق شرحه فى البند السابق ، وكما هو مبين فى شكل (١٢ ـ ٧) ويكون وضع المحرك الأول فى مكان القدرة المراد نقلها ، بحيث تقوم القدرة المراد نقلها بادارة عضوه الدائر عند السرعة المطلوبة ، إما فى اتجاه دوران مجاله المغناطيسى ، أو فى عكس اتجاه دورانه على حسب الأحوال (يتم عكس اتجاه دوران المجال المغناطيسي بتبديل توصيل خطين إلى الينبوع) ويكون وضع المحرك الثانى فى المكان المراد نقل القدرة اليه بحيث يوصل عمود إدارته إلى الجهاز المستهلك للقدرة عند نفس السرعة المطلوبة .

ويبين شكل (١٤ ـ ٧) توزيعات القدرة فى كل من اتجاهى الدوران ،

عندما يكون تردد الينبوع ٥٠ ذبذبة فى الثانية وعدد أقطاب كل من المحركين ستة ، وذلك مع اهمال المفقودات.



شكل (١٤ ـ ٧)

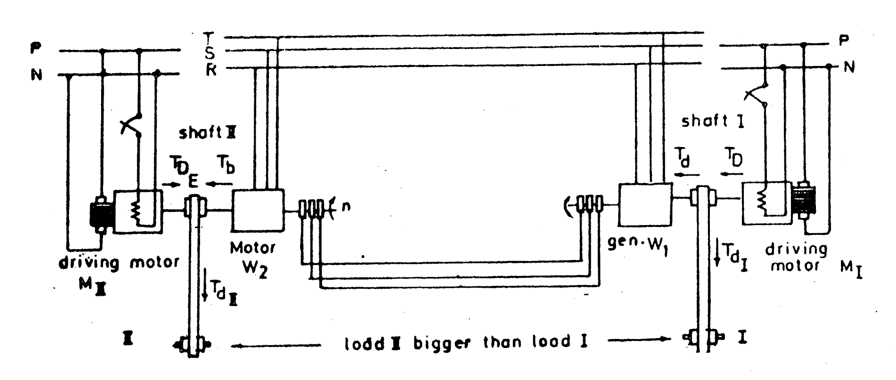
هذا ونظراً لأن عمود الإدارة الكهربى عبارة عن مجموعة متزامنة فى الواقع ، فانها يمكن أن تتعرض للاهتزازات أو التأرجح ، شأنها فى ذلك شأن الآلات المتزامنة (صفحة ٢٥٨ من كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية) وتحدث هذه الاهتزازات فعلا ، وخاصة عندما يكون الدوران فى عكس اتجاه دوران المجال المغناطيسي . ويكون فعل التخميد الميكانيكى كافياً عادة لعدم تسبب هذه الاهتزازات فى الازعاج.

(١١ ـ ٧) عمود الادارة الكهربى المعوض:

(The compensating electrical shaft)

الغرض الاساسى من عمود الادارة الكهربى فى هذه الحالة ، كما هو مبين

في شكل (١٥ - ٧) ، جعل عمودي الادارة I و II يدوران دائماً عند نفس السرعة بالضبط ، في حين انهما مختلفا التحميل ، ويقوم بادارتها محركان M_I ، M_{II} محملين بالتساوى .



شكل (١٥-٧)

يمتلك محركا الادارة(driving motors) M_I M_{II} منحنيي عزم دوران مع السرعة متماثلين تماما . ونظراً لان عمود الإدارة الكهربى يجعل عمودى الادارة I , II يدوران بنفس السرعة دائماً ، فان عزم دوران الادارة T_D لكل من محركى الادارة يكون واحداً ، فيصبح هذان المحركان محملين بالتساوى طوال الوقت.

إذا فرضنا أن عمود الادارة I محمل بعزم الدوران T_{dI} ، وعمود الادارة II بعزم الدوران T_{dII} ، وأن هذا الاخير أكبر من الاول ، نحصل على العلاقات الآتية (راجع شكل (١٥ - ٧)):

$$T_D = T_{dI} + T_d \rightarrow \text{for shaft I}$$

$$T_D = T_{dII} - T_b \rightarrow \text{for shaft II}$$

$$\therefore \quad T_{dII} - T_{dI} = (T_d + T_b) \qquad (٧-١٨)$$

وهذا يعنى أن الفرق بين عزمى دوران التحميل على الجانبين I ، II يكون دائماً مساوياً لمجموع عزمى دوران المدخل والمخرج لعمود الادارة الـكهربى . وفى حالة تساوى هذين الاخيرين ، عند اهمال المفقودات ، يصبح الفرق مساويا لضعف أحدهما . وهذه حقيقة على جانب كبير من الاهمية ، بالنسبة لتحديد قيمة النهاية العظمي للفرق بين عزمي الدوران ، الذى يمكن لعمود الادارة الكهربى أن يعوضه عند نفس السرعة . وتتأثر قيمة النهاية العظمى هذه بطبيعة اتجاه دوران عمود الادارة الكهربى ، هل هو فى اتجاه دوران المجال المغناطيسى ، أو عكسه ، حيث يمكن الحصول على قيمة أكبر للنهاية العظمى للفرق، عندمايكون الدوران فى عكس اتجاه المجال المغناطيسى .

كذلك تختلف ظروف تحميل محركي الادارة M_I و M_{II} على حسب اتجاه الدوران بالنسبة لاتجاه دوران المجال المغناطيسي ، فعندما يكون الاتجاهين متماثلين يأخذ عمود الادارة الكهربى نصيبه من الحمل مخففاً اياه عن محركي الادارة ، وعندما يكون الاتجاهان متضادين يصبح عمود الادارة الـكهربى محملا على محركي الادارة ، مما يزيد من عبئها . ويتضح ذلك من العلاقات الآتية:

عندما يكون الدوران فى نفس الاتجاه:

$$T_D = \frac{1}{2}(T_{dI} + T_{d\,I}) - \frac{1}{2}(T_t - T_d) \qquad (٧-١٩)$$

عندما يكون الدوران فى اتجاهين متضادين:

$$T_D = \frac{1}{2}(T_{dI} + T_{dII}) + \frac{1}{2}(T_d - T_b) \qquad (٧-٢٠)$$

مثال محلول (١) :

Explain briefly with the aid of a neat sketch the function of a compensating electrical shaft. Write down the torque equations relating the driving motor torques, and the load torques to be compensated, for both directions of the rotating field in the induction motors.

In a compensating electrical shaft arrangement the driving machines are two identical D.C. shunt motors, which have both the following torqu espeed characteristic:

Troque (Kg.m.)	125	105	80	50
Speed (r.p.m.)	800	850	900	950

Tqe induction motors are 4—pole machines connected to the same 50 Hz supply, with their rotors running in the direction of the magnetic fields. The load torques to be compensated are 90 and 110 Kg.m. at a speed of 825 r.p.m. Find the ratings of induction motors, neglecting all losses.

الجزء النظرى من السؤال يحل بمراجعة المعلومات المعطاة سابقاً

بالرجوع إلى منحنى عزم الدوران مع السرعة لكل من محركي الادارة نجد أن عزم دوران الادارة T_D لكل منهما ، عند سرعة الدوران المعطاة ٨٢٥ لفة فى الدقيقة ، هو ١١٥ كيلوجرام .متر . وباهمال المفقودات نجد أن :

For shaft I : $T_D = T_{dI} + T_d$

For shaft II : $T_D = T_{dII} - T_b$

$\therefore T_d = T_D - T_{dI} = 115 - 90 = 25$ Kg.m.

$T_b = T_{dII} - T_D = 145 - 115 = 25$ Kg.m.

$$n_s = \frac{3000}{2} = 1500 \text{ r.p.m.} \quad , \quad S = \frac{1500 - 825}{1500} = 0.45$$

$$P_m = T\omega = \frac{25 \times 9.81}{1000} \times \frac{2\pi \times 825}{60} = 21.2 \text{ KW}$$

$$\text{input } P_i \overset{\text{ت}}{=} P_g = \frac{P_m}{1 - S} = \frac{21.2}{0.55} = 39.5 \text{ KW}$$

مثال محلول (٢):

Explain briefly with the aid of a connection diagram how an electrical shaft is used to transmit a certain amount of power at exactly the same speed.

Consider the case of transmitting a torque of 70.75 Kg.m. at a speed of 825 r p m, using two identical induction motors with 4 poles each and their stators connected to 50 HZ supply, for both cases of rotation in and against the dire tion of the field, and show the flow of power in the stators and rotors of both machines

الجزء النظرى من السؤال يحل بمراجعة المعلومات السابقة

(أولا) عندما يكون اتجاه دوران العضو الدائر فى اتجاه دوران المجال المغناطيسى:

$$n_s = \frac{3000}{2} = 1500 \text{ r.p.m.} \;,\; s = \frac{1500 - 825}{1500} = 0.45$$

$$\omega = \frac{2\pi \times 825}{60} = 86.3 \text{ radian/sec}$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi \times 1500}{60} = 157 \text{ radian/sec}$$

بالنسبة للمحـــــرك المدار ، فان القدرة الداخلة على عمود إدارته P_{mi} عبارة عن:

$$P_{mi} = T\omega = 70.75 \times \frac{9.81}{1000} \times 86.3 = 60 \text{ KW}$$

والقدرة فى دائرة العضو الدائر P_{cu2} ، وهى التى تسرى من دائرة العضو الدائر فى محرك الادارة علي الناحية الأخرى ، عبارة عن:

$$P_{cu2} = s\,P_g = s\,T\omega_0 = 0.45 \times 70.75 \times \frac{9.81}{1000} \times 157 = 9.1 \text{KW}$$

وتكون القدرة الداخلة في الينبوع على هذه الناحية P_{si} عبارة عن:

$$P_{si} = T\omega_0 \overset{\text{ى}}{=} P_{gi} = 70.75 \times \frac{9.81}{1000} \times 157 = 109.1 \text{ KW}$$

$$\text{Check } P_{gi} = P_{mi} + P_{cus} = 60 + 49.1 = 109.1 \text{ KW}$$

بالنسبة لمحرك الادارة :

القدرة التى تسرى من دائرة عضوه الدائر P_{cu2} ، كما وجدناها سابقاً ، عبارة عن:

$$P_{cu2} = 49.1\ KW = s\,T\omega_0$$

القدرة الخارجة على عمود الادارة P_{mo} عبارة عن:

$$P_{mo} = \frac{(1-s)}{s} P_{cu2} = \frac{0.55}{0.45} \times 49.1 = 60\ KW, n = 825\ r.p.m.$$

القدرة الداخلة من الينبوع لادارة المحرك P_{so} عبارة عن:

$$P_{so} \overset{\sim}{=} P_{go} = \frac{P_{mo}}{(1-s)} = \frac{60}{0.55} = 109.1\ KW$$

check : $P_{go} = P_{mo} + P_{cu2}$, $109.1 = 60 + 49.1\ KW$

(ثانيا) عندما يكون اتجاه دوران العضو الدائر فى عكس اتجاه دوران المجال المغناطيسي:

$$n = -825\ r.p.m\ , \quad s = \frac{1500 + 825}{1500} = 1.55$$

$$\omega = 86.8\ radiau/sec\ , \quad \omega_0 = 157\ radian/sec$$

بالنسبة للمحرك المدار : فان القدرة الداخلة على عمود ادارته P_{mi} هى ٦٠ كيلو وات والقدرة الداخلة من الينبوع للمساعدة على إدارة المحرك فى عكس إتجاه دوران المجال المغناطيسى هى P_{so} عبارة عن :

$$P_{so} \overset{\sim}{=} P_{go} = T\omega_0 = 109.1\ KW$$

$$= \frac{P_{mi}}{1-s} = \frac{60}{0.55} = 109.1\ KW$$

القدرة التى تسرى من دائرة عضوه الدائر P_{cu2} إلى العضو الدائر فى محرك الادارة عبارة عن :

$$P_{cu2} = T\omega_0 s = 70.75 \times 157 \times 1.55 = 169.1 \text{ KW}$$

بالنسبة لمحرك الادارة : القدرة التى تسرى فى دائرة عضوه الدائر : كما وجدناها سابقا عبارة عن :

$$P_{cu2} = 169.1 \text{ KW}$$

القدرة الداخلة فى الينبوع P_{si} عبارة عن :

$$P_{si} = T\omega_0 = 109.1 \text{ KW}$$

القدرة المعطاة على عمود الادارة عند السرعة ٨٢٥ لفة فى الدقيقة عبارة عن :

$$P_{mo} = \frac{1-s}{s} P_{cu2} = \frac{0.55}{1.55} \times 169.1 = 60 \text{ KW}$$

(ثالثا) المحركات التأثيرية الخطية

Linear Induction Motors

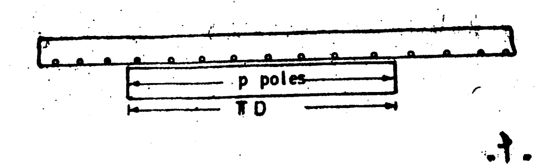
(١٢ - ٧) منشأ المحركات الخطية :

لقد كان الاهتمام بوسائل الجر الكهربى (Electric Traction) ناشئا فى البداية بسبب الحاجة إلي وسائل مواصلات أكثر سرعة وأقل تكلفة واحتياجا إلي الصيانة من وسائل النقل بالآلات الحرارية المتاحة . وكان لمحرك التيار المستمر دور كبير في هذا المضمار ، يتلوه فى ذلك المحركات التأثيرية . ومحرك التيار المستمر يفضل المحرك التأثيرى من حيث سهولة التحكم في

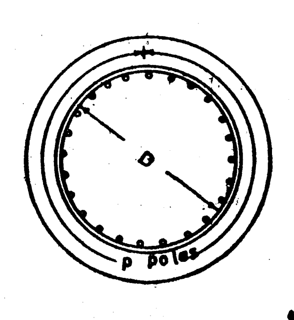
سرعته ، ولا يعيبه سوى احتوائه على المبدل ، الذى يعد من أعقد الأجزاء تركيباً فى الآلات الكهربية وأكثرها حاجة إلى الصيانة والرعاية.

ولكن نظراً لأن سرعة المحركات الكهربية تكون محـــدودة بسبب اعتبارات التصميم ، التى تتعلق بمقادير القـــوى المركزية الطاردة (Centrifugal Forces) المؤثرة على الملفات الراقدة فى المجارى (هندسة الآلات الكهربيه صفحة ٥٤٨ و ٥٤٩ و نظريات و تصميم الآلات الكهربيه صفحة ٢٩٣ و ٢٩٤)، فقد ظلت الحاجة ملحة إلى استخدام صندوق تروس (Gear Box) لنقل الحركة من عمود إدارة المحرك الكهربى إلى عمود ادارة العجل فى وسيلة النقل ، بسرعات قد تكون أعلى كثيراً من سرعة المحرك نفسه . ومع ذلك فقد ظلت السرعات ، التى يمكن الحصول عليها بهذه الوسيلة ، أقل كثيراً من مستلزمات التطور فى تكنولوجيا العصر الحديث ، بسبب الاجهادات الميكانيكية غير المحتملة بالنسبة لصندوق التروس ، والتآكل الفظيع الذى يمكن أن يعانيه ، اذا زادت السرعة عن حد معلوم .

عند ذلك نشأت فكرة استخدام محركات كهربية لدفع وسيلة النقل فى مجراها مباشرة بالسرعات الكبيرة المطلوبة ، دون الحاجة الى وسيط ولم يكن فى هـــذه الفكرة أية غرابة ، نظراً لأن تصميم ودراسة الملفات على المحرك الكهربى تكون دائماً على سطح مفرود . وهذا يوحى بان أية آلة كهربية دوارة يمكن انتاجها على صورة آلة خطيه باستخدام رقائق حديد مستطيلة ، بدلا من الرقائق المستديرة ، توضع فى مجاريها أنواع مشابهة من الملفات . وتحل القوة والعجلة الخطية ، فى هذه الحالة ، محل عزم الدوران والعجلة الدائرية فى المحـــرك الدوار . ويبين شكل (١٦ ـ ٧) ا منظر المحرك الخطى بالمقارنة مع المحرك العادي المبين في ب من نفس الشكل.



أ



ب

شكل (١٦ – ٧)

هذا وتوجـــد محركات خطية من أنواع مختلفة (تأثيرية ومستمرة ومتزامنة .. الخ)، نختص منها بالذكر هنا المحركات التأثيرية الخطية فقط .

(١٣ – ٧) المجال المغناطيسي السيار

(Travelling magnetic field)

عند مرور تيارات متزنة ثلاثية المراحل في ملفات ثلاثية المراحل ، ينشأ مجال مغناطيسي دائر ، كما سبق بيانه فى مواطن كثيرة . ويكون منحنى القوة الدافعة الكهربية ، وكذلك منحنى كثافة الخطوط المغناطيسية ، موزعا على شكل جيبي حول الثغرة الهوائية، كما تنص على ذلك المعادلة (١ – ٣). وتكون سرعة دوران المجال المغناطيسى هى سرعة التزامن n_s ، كما أن السرعة المحيطية v_s لهذا المجال تتحدد بناء على ذلك بالقيمة:

$$v_s = \frac{\pi D n_s}{60} = \frac{\pi p \tau_p n_s}{\pi 60} = 2 f \tau_p \qquad (٧ - ٢١)$$

حيث p هو عدد الأقطاب الكلى ، بدلا من 2p فى المحرك المعتاد .

من الواضح أننا نحصل على المحرك الخطى ، المبين فى شكل (١٦ - ٧) أ من المحرك الدوار، المبين فى شكل (١٦ - ٧)ب ، بقطع هذا الأخير فى العضو الثابت والعضو الدائر فى اتجاه نصف قطرى، ثم فرده فيكون الجزء العلوى فى (أ) هو العضو الدائر المفرود ، ويكون الجزء السفلى هو العضو الثابت المفرود . وفى هذه الحالة يصبح المجال المغناطيسي الدائر سائراً في الثغرة الهوائية بين الجزءين ويطلق عليه اسم المجال المغناطيسي السيار ، وتكون سرعته الخطية هى نفس السرعة المحيطية المعطاة بالمعادلة (٢١ - ٧) ، وهى سرعة التزامن بالنسبة للمحرك الخطى.

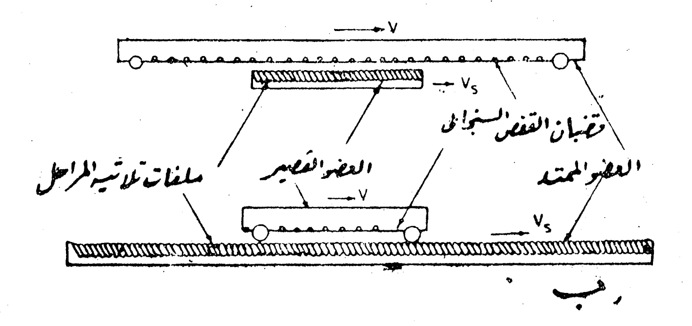
ويلاحظ أننا نستطيع الآن تحديد بداية ونهاية لكل من نوعى الملفات فى المحرك الخطى ، بينما كانت هذه الملفات ذات صفة مستمرة فى المحرك المعتاد، بسبب وجودها على محيط دائرة ، وهو ما لا أول له ولا نهاية . ويقتضي الأمر ، بالنسبة للمحرك الخطى في هذه الحالة ، أن يكون أحد جزءيه ممتداً بحيث يتحرك عليه الجزء الآخر مع المجال المغناطيسى السيار ، لكى تتم الصورة على أساس مماثل للمحرك المعتاد.

(١٤ - ٧) المحرك الخطى ذو العضو الثابت القصير والمحرك ذو العضو الدائر القصير :

(Short stator and short rotor linear induction motors)

قد يكون الجزء الممتد فى المحرك الخطي هو المقابل للعضو الدائر فى المحرك المعتاد فيطلق عليه اسم المحرك الخطي ذي العضو الثابت القصير ،

وقد يكون الجزء الممتد هو المقابل للعضو الثابت ، فيطلق عليه اسم المحرك الخطى ذى العضو الدائر القصير . وفى الحالة الأولى توضع الملفات ثلاثية المراحل، التي توصل الى الينبوع ثلاثى المراحل ، على العضو الثابت القصير ، ويكون العضو الممتد مكونا من قضبان ، مناظراً لنوع القفص السنجابى فى المحركات المعتادة ، كما هو مبين فى شكل (١٧ - ٧) ا . ويراعى أن



(شكل ١٧ - ٧)

يكون العضو القصير مغطى فى خلال الحركة دائما بقضبان القفص السنجابى.

وتوزع الملفات ثلاثية المراحل على العضو الثابت الممتد فى الحالة الثانية، بينما يكون العضو القصير من نوع القفص السنجابى ، كما هو مبين فى شكل(٧ - ٧)ب . ومن البديهى أن هذا النوع يستخدم فى الحالات التى يكون فيها العضو الممتد ذا طول محدود ، أى عندما تكون الحركة على المدى القصير . ويراعى أن تظل الملفات فى خلال الحركة مغطاة دائماً بقضبان القفص السنجابى على العضو القصير.

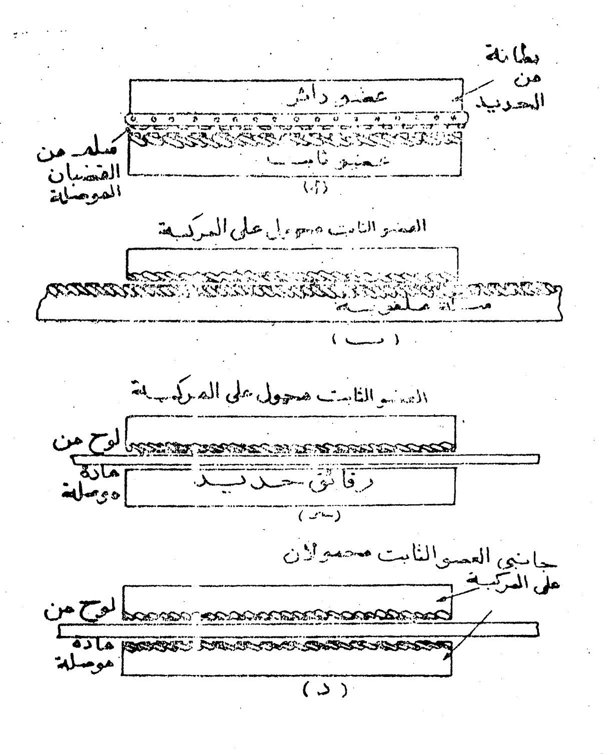
ونظراً لأن الحركة بين العضوين تكون نسبية ، بصرف النظر عن أن يكون أي العضوين هو المتحرك والآخر هو الثابت ، كما هى الحال بالنسبة

للمحرك المعتاد، فانه يمكن أن يكون العضو المحتوى على قضبان القفص السنجابى فى كل من ا ، ب (شكل ١٧ – ٧) هو الجزء المتحرك فى الحالتين.

هذا ، وقد ذكرنا أن أحد العضوين ، وهو الممتد فى شكل (١٧–٧) ا ، يتكون من قضبان على نمط القفص السنجابى فى المحركات المعتادة ، وقد كان ذلك من قبيل التشبيه ، ولتقريب الحقائق من ذهن القارئ ، وفى الحقيقة أن مثل هذا العضو يصنع عادة من الواح ممتدة من الالومنيوم (على أساس أنه أرخص تكلفة من النحاس) ويوجد حالياً بعض الاتجاهات لصنع العضو الممتد من ألواح الحديد (سبائك خاصة ذات معامل مقاومة محدود يقدر بحوالى ١٥ × ١٠ –٨ أوم متر مربع / متر بالمقارنة بحوالى ٧و١ × ١٠–٨ أوم متر مربع / متر للنحاس) ، والغرض من ذلك هو رخص التكاليف ، الى جانب الحصول على مسار ذى معاوقة مغناطيسية صغيرة لخطوط المجال المغناطيسى ، مما يقلل من تيار المغطسة ، ويعمل على تحسين معامل القدرة .

(١٥–٧) العضو الثابت مزدوج الجانبين :

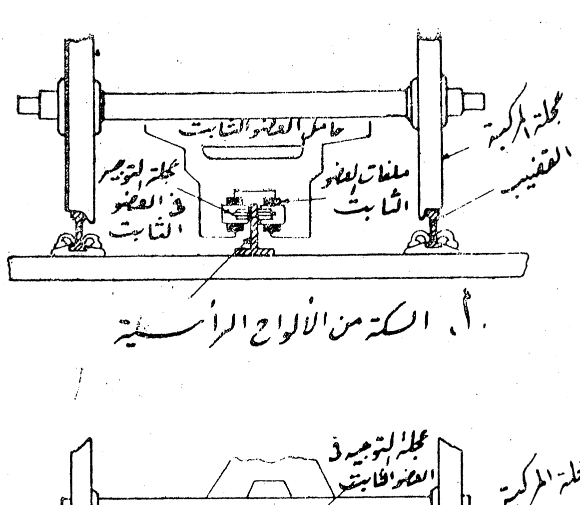
يبين شكل (١٨ – ٧) طريقة تطور المحرك المعتاد حتى نصل الى المحرك ذى العضو الثابت مزدوج الجانبين . الجزء ا يبين المحرك الخطى المناظر للمحرك المعتاد ، كما حصلنا عليه فى البداية ، حيث يكون العضو الثابت ملفوفاً ، ويكون العضو الدائر عبارة عن نظير القفص السنجابى ، وهو فى هذه الحالة على شكل سلم من القضبان الموصلة (Conducting ladder) ذى بطانة من الحديد لتكملة الدائرة المغناطيسية . الجزء ب يبين كيف يمكن أن يتطور ذلك ، فتصبح السكة نفسها ملفوفه ، وهو امر غير عملى لما يتكلفه ذلك من نفقات باهظة . وهذا يؤدي إلى التطور المبين فى الجزء (جـ) حيث تصبح السكة عبارة عن لوح من مادة موصلة ، كما سبق ذكره فى البند السابق ، مع وجود نظير للعضو الثابت من الناحية الاخرى ، ولكنه عبارة عن مجرد رقائق من الحديد لتكملة الدائرة المغناطيسية . الجزء د يبين كيف يصبح المحرك ذا عضو



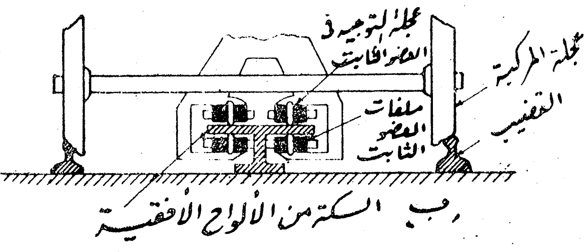
شكل (١٨ ـ ٧)

ثابت مزدوج الجانبين بعد لف هذا الرقائق بملفات مماثلة لملفات العضو الثابت، وذلك للاستفادة بها كهربياً، الى جانب الاستفادة من وجودها مغناطيسياً.

يبين شكل (١٩ ـ ٧) كيف يكون العضو الثابت مزدوج الجانبين محمولا على المركبة، لكى يسير بحذاء السكة المكونة من ألواح موصلة، وذلك عندما تكون هذه الألواح فى وضع رأسي، كما فى الجزء ا، وعندما تكون الالواح في وضع افقي، كما فى الجزء ب.



أ. السكة من الألواح الرأسية



ب. السكة من الألواح الأفقية

شكل (١٩-٧)

(١٦-٧) بعض المبادئ الأساسية الخاصة بالمحركات التأثيرية الخطية :

تبين المعادلة (٢١-٧)،التى حصلنا عليها فى بند (١٣-٧) ، سرعة التزامن الخطية للمحرك بدلالة التردد والخطوة القطبية . ويمكن أن يكون عدد الاقطاب فى المحرك الخطى فردياً أو زوجياً ، ولذلك رمزنا إليه فى هذه المعادلة بالرمز p ، بدلا من 2p كما كنا نفعل مع المحرك المعتاد . هذا ويكون الإبتدائى فى المحرك الخطى هو العضو الذى يوصل إلى الينبوع ، والثانوى هو العضو الآخر ، ويمكن أن يكون أى منها هو العضو الثابت . وهناك ثلاثه أنواع مميزة من المحركات الخطيه وهى : (١) آلة القوة ، وهى خاصة بانتاج قوة دفع فى حالة السكون ، أو عند سرعه منخفضة علي مدى مسافة

قصيرة ، وتصنع بأحجام صغيرة . (٢) آلة الطاقة ، وهى خاصة باعطاء طاقة حركة لكتلة بتعجيلها من السكون الى سرعة عالية على مدى مسافة معينة . (٣) آلة القدرة ، وهى خاصة بنقل الكتل ، عند سرعات عالية فى العادة ، وبمعامل كفائة قدرة عالي نسبياً .

يكون طول الموجه λ فى المحرك الخطىعبارة عن ضعف طول الخطوة القطبية $2\tau_p$ ، ولذلك نجد أنه عندما يكون طول الموجة متر واحد والتردد ٥٠ ذبذبة فى الثانية ، فانه تطبيقاً للمعادلة (٢١-٧) تكون سرعة التزامن عبارة عن :

$$v_s = \lambda f = 2\tau_p f = 1 \times 50 = 50 \text{ m/sec}$$

$$= 50 \times \frac{1}{1000} \times 3600 = 180 \text{ Km/h}$$

وهذا يعنى أن سرعة النقل بآلات القدرة تكون عالية. وهذهھى سرعة المجال المغناطيسي للعضو الثابت ، أما سرعة العضو الآخر v وهو الذى يطلق عليه اسم الجارى (runner) فى هذه الحالة ، فهى ترتبط مع سرعة التزامن ومعامل الإنزلاق S بنفس العلاقة كما فى المحرك المعتاد ، أى أن :

$$v = v_s (1 - S) \qquad (٧-٢٢)$$

ويكون تقسيم القدرة المنقولة عبر الثغرة الهوائية P_g الى قدرة ميكا نيكية P_m ، ومفقودات نحاسية فى ملفات العضو الدائر P_{cu2} ، بنفس النسبة كما فى المحرك المعتاد أى $1 : (1-S) : S$

يختلف المحرك الخطى عن المحرك المعتاد من ناحيتين رئيسيتين : (أولا) أن تيار المغنطة في المحرك الخطي يكون اكبر كثيراً بسبب وجود ثغرة هوائية

كبيرة و (ثانياً) أن معالم المحرك الخطى تختص طبيعتها بعدم الإستمرار ، مما يؤدى الى تشوهات في منحنى توزيع المجال المغناطيسي ومفقودات طرفية (edge losses) . هذا ويمكن إستنتاج خواص التشغيل للمحرك الخطى على أساس دائرة مكافئة تشبه في تكوينها دائرة المحرك المعتاد المكافئة ، ويكون استنباط ثوابت هذه الدائرة بالطرق التى استخدمها ليزويت (مرجع رقم ٢٢) .

مسائل متنوعة

1. A 6-pole induction motor is supplied by an 8-pole alternator running at 750. r.p.m. If the motor slip is 3% what is its actual speed

2. If an 8-pole induction motor runuing from a supply of 50 c/s has an e.m f. in the rotor of frequency 1.5 c/s. determine (i) the speed of the motor, (ii) the slip.

3. A 3-phase 50 c/s induction Motor with its rotor star connected gives 10 volts root square at standstill between slip rings at open circuit. Calculate the current in each phase of the rotor winding when joined to a star connected load each limb of which has a resistance of 10 ohm and reactance of 10 ohm. The resistance/phase of the rotor winding is O. 2 ohm, and its reactance at standstill is 10 ohm. Calculate the current in each rotor phase when the slip rings are short circuited and the motor is running with a slip of 5 %.

4. A500 volt, 50 c/s, 3-phase I.M. (induction motor) develops 20 H.P. inclusive of mechanicel loses when running at 985 r.p.m. the power factor being 0.87. Calculate (a) the slip (b) the rotor copper losses (c) The total output if the stator losses are 1500 watts, (d) the line current (e) number of cycles per minute of the rotor E.M.F.

5. 3-phase I M. has synchronous speed of 250 r.p.m. and a 4% slip at full-load. The rotor has a resistance of 0.02 ohm per phase and a standstill leakage reactance of 0.15 ohm/phase. Calculate (a) The speed at which maximum torque is developed, (b) The ratio tf maximum to full load torque.

6. A 35 H.P., 4-pole, 50 c/s, I M. has its full load torque at a slip of 2%. The maximum torque = 2,5 full load torque. Find the relation be tween the torque and slip. Draw the torque-slip characteristic.

7. An I.M. has a rotor reactance/phase at standstill of 0.3 ohm. plot curves of torque as o/o ge. of maximum torque to a base of slip for constant rotor resistance :

a) 0.08 Ohm b) 0.8 Ohm. respectively.

Plot curves of rotor current, if the standstill voltage is 300 volts/phase. The frequency of the supply remains constant.

8. I.M carries a rotor current per phase of 10 amps., when the slip = 5%. If the rotor effective resistance is 0.1 ohm/ph. determine the internal power developed/ph., the copper losses and the rotor input.

9. A spuirrel cage I.M. has two rotor cages, one with an effective resistance and standstill reactance 0.6 and0.8 respectively. The other rotor cage has an effective resistance and standstill reactance of 0.3 and 3 ohms respectively. Plot curves of torque due to each winding and the total torque on a base of slip.

10. A 3 phase squirrel cage I.M. rated 2 KW, 500 V, 50 cycles with 4 poles gave the following load readings at 500 V.

Load (apporx)	4/4	3/4	1/2	1/4
Pi KWS	105	79.5	52.5	26.3
Ii Amqs	143	107	75	49
Slip %	3.4	2.55	1.7	0,85

Resistance mdasured at 20^0C between stator terminals = 0,118 ohm .

Friction and windage losses = 1.3 KW, Iron losses = 1.9 KW.

Calculate and draw for a temp. of stator winding 75°C the characteristics of the mo'or, i.e. current, efficiency and output as functions of the input. (L.U).

11. A 3 phase, 6 pole induction motor is supplied from 50 c/s supply. The slip ring rotor is star connected and has an induced E.M F of 110 V between slip rings at standstill on open circuit with the normal voltage applied to the statot. The resistance end standstill reactance of each rotor phase are 0.1 and 0.9 ohm respectively. The Full lood speed is 960 r.p.m. Calculate for full load :

(a) the rotor copper losses.

(b) the total mechanieal power developed.

(c) the torque in kg.m.

(d) the maximum torque in kg.m. and the slip at which it occurs. Neglect stator drop. (Stator to totor turns ratio is 2).

12. Derive the relationships between power output, rotor losses and speed in an induction motor.

A 6-pole, 400-volt, 3-phase, 50-c/s induction motor has a star-connected stator having a resittance of 0.08 ohm/phase. When the motor is running unloaded, the input is 1.2 kw, of which 0.4 kw, is friction and windagé loss. (Negleet copper loss.) Calculate (a) the rotor copper loss and (b) the horsepower output of the motor when running at 940 r.p.m. and taking an input of 42 kw at 0.86 power factor. (L.U.)

13. Explain the relationships between the power output,

speed and rotor losses in a polyphase induction motor. What is the effect of varying the resistance of the rotor circuit when a given torque is being developed.

A 6-pole induction motor running at 960 r.p.m. on a 400-volt, 3-phase supply of frequency 50 c/s takes a current of 71.5 A at 0.85 power factor. The stator winding, star-connected, has a resistance of 0.0783 ohm/phase. If stator iron loss is 0.8 kw and friction plus windage losses are 0.4 kw total, calculate (a) the output torque at the pulley and (b) the rotor copper loss.

14 The power input to a 500 volt, 50 c/s, 6 pole, 3 phase induction motor running at 975 R.P.M. is 40 K.W. at 0.88 power factor. The stator losses are 1.0 K.W. and the friction and windage losses total 2.0 K.W. Calculate : (a) the slip. (b) the line current, (c) the brake horse power; (d) the rotor copper losses, (e) the efficiency, (f) if the rotor resistance is 0.2 ohm per phase, calculate the external resistance per phase which must be added to lower the speed to 850 R.P.M. with the same full load torque.

15. A 3 phase, 10 pole, star connected induction motor has a final output of 500 H.P when connected to 2200 V, 50c/s supply and runs with a slip of 3% .The stator losses are 7 KW and the mechanical losses are 8 KW. If the power factor is 0.88 find the line current, the full load torque and the speed of the motor.

If the equivalent rorot reactance per phase, referrd to the stator, is 2 ohms, find the value of the maximum torque and the approximate value of the speed at which it occurs. Neglect voltage drop on the stator side.

16. A 3-phase 6-pole induction motor running from a 50-c/s supply has an input of 32kw when delivering full-load output. On no-load the input is 1 kw, of which 250 W are windage and friction losses. Copper loss under these conditions may be neglected. On carrying out a locked rotor test with full-load current circulating, the input is 2.5 kw, of which 1.5 kw is stator copper loss. (Iron losses are negligibe) Calculate the full-load output and speed. (L.U.)

17. A 4-pole iuduction motor running from a 50 c/s supply has an input of 32 kw when delivering full-load output, On no-load the input is 1 KW, of which 250 W are windage and friction losses. Copper loss under these couditions may be uegiected. On carrying out a locked-rotor test with full-load current circulating. the input is 2.5 kw of which 1.25 kw is stator copper loss. (Iron losses may ba neglected under these conditions.) Calculate the full-load sh ft output and speed. (L.U.)

18. Explain briefly of the priuciple action of a 3-phase induction motor. Distinguish between cage rotor and wound rotor motors and give an account of their operating characteristics.

Neglecting the impedance of the stator winding, derive an expression for the torque developed by the rotor of a 3-phase motor in terms of the slip and the rotor constants when the stator winding is supplied at constant voltage, r.m.s. and frequency. Show that the maximum torque developed is independent of the rotor resistance.

19. A 3-phase iuduction motor has a rotor resistance per phase of R, and a standstill leakage reactance per phase of X. The phase supply voltage is V. The resistance and leakage

reactance of the stator winding are negligible. If this motor operates at a fractional slip of S and torque developed is T, prove that :

$$T = k.S.V^2 R/(R^2 + S^2X^2)$$

where k is a constant.

Such a motor, when connected to a 400 - V supply, has a starting torque equal to the full - load torque, and a slip of 4 per cent at full load. If the supply voltage is reduced to 330 V, determine :

(a) the starting torque in terms of the full - load torque.

(b) the slip when the motor is rotating and developing full - load torque .

Assume that at full - load slip the leakage reactance of the rotor is small compared with its resistance .

20. Explain, briefly, with the aid of connection diagrams two methods used in practice for starting 3 phase squirrel cage induction motors . (L. U.)

A delta connected, 3 phase, 220 V, 50 c/s squirrel cage induction motor has 4 poles and runs at a speed of 1440 r.p.m when it develops an output of 15 H.P. The power factor is 0.85, the mechanical losses are 0.75 H.P, and the stator losses are 1200 watts .

(a) Calculate for this load the slip, the rotor copper losses, the efficiency, the torque and the line currents .

(b) Find the value of the maximum torque if it were developed at 1100 r.p.m.

21. Explain two different methods for starting a squirrel cage induction motor .

A 6 pole, 3 phase induction motor develops 30 H.P., including mechanical losses of 2 H.P., at a - speed of 950 r.p.m. on 550 V, 50 cycle mains. The power factor is 0.89. Calculate for this load (a) the slip; (b) the rotor copper loss; (c) the total input if the stator losses are 2000 W; (b) the efficiency; (e) the line current; (f) the number of complete cycles of the rotor e.m.f. per minute .

22. A 6 — pole, 50 C/S, 3 — phase induction motor running on full — load develops a useful torque of 120 lb. ft. and it is observed that the rotor e.m.f. makes 90 complete cycles per minute. Calculate the B.H.P. if the mechanical torque lost in friction be 10 lb . ft. Find the copper lossin the rotor windings, the input to the moror and the efficiency. Stator loss = 750 watts .

23. A squirrel cage induction motor runs at aslip of 5% at full load. Assuming the rotor resistance is independent of rotor frequency and neglecting rotational losses and stator impedance.

a) Compute the ratio of the starting torque to the full load torque .

b) Compute the ratio of the maximum torque to the full — load torque and the slip at which maximum torque occurs .

24. A 4 – pole, 50 C/S, 3—phase induction motor has rotor resistance per phase of 0.02 ohm and reactance of 0. 12 ohm per phase. what is the value of speed at maximum torque? Find the amount of external resistance per phase required to be inserted to obtain 75% of maximum torque at starting .

25. A three — phase, slip rings, induction motor is used to drive a fan. The motor is 20 HP,16 pole, working at 50 C/S, the full — load slip is 0.03, and the resistance measured between 2 slip rings = 0 04 ohm at stand still. The (slip / torque) curve of the motor is assumed o· be a straight line .

This motor is required to drive a fan. The fan requires a torque of 8000 NW — mt. to be driven at a speed of 280 r.p.m. and in general its torque is proporational to the square of its speed .

a) What value of a resistance which must be inserted in series with each rotor winding so that the I. M. drive this fan at a speed of 320 r. p.m.?

b) What is the percentage overloading at this condition ?

26. A300 H. P., 3000 volts, 3 — phase I. M. has a magne-tizing current of 20 amps. at 0.10 power factor & a short circuit (or block) current of 240 amps. at 0.25 power factor . Draw the circle diagram, determine the power factor at full — load & the maximum H. P.

27, Draw the circle diag. for a 20 H. P., 440 volt, 50 c / s, 3 — phase I. M. from the following test figures (line values.) .

No load : 440 volts, 10 amps, power facror 0.2

Short circuit : 200 volts, 50 amp, power factor 0.4

From the diagram estimate (a) the line current & power factor at full - load b) The maximum H. P. c) The stalling torque. Assume the rotor and stator I^2R losses on short circuit to be equal .

28, The following particulars apply to a 200 H.P., 3- phase

25 c/s, 5000 volts I. M. with stator and rotor winding star connected. Turns per phase, stator = 576 R_1 = 3.6 ohm, R_2 = 0.03 ohm, X_1 = 16 ohm, X_2 = 0.07 ohm. No load current = 6 amps. at 0.07 p. f. Draw the circle diagram & determine from it the starting torque on full voltage with the rotor short circuited, the full load curtent & power Factor .

29. A delta connected, 3 phase, 2?0 V, 50 c / s, 4 pole induction motor develops 10 brake H.P. at 14[illegible]0 r.p.m. and 0. 8 power factor. The mechanical losses are 0.6 H.P. and the stator losses are 740 watts.

(a) Calculate for this load the slip, the rotor copper losses, the efficiency and the phase current :

(b) Find the ratio of the starting to full load current when the motor is started with a star delta switch. given that the motor takes a short circuit current of 50 amps when 110 V are applied to the stator in delta connection .

30. Draw the circle diagram for a 5 H. P. 200 V, 50c/s, 4 pole, 3 phase : star connected induction motor from the following test data : -

No load : line voltage 200 V, line current [illegible] amps, power input 350 watts. Short circuit : line voltage 100 V, line current 29 amps, power input 1700 watts .

Estimate from the diagram the full load current, power factor and torque assuming the stator copper losses at standstill to be equal to the rotor copper losses .

31. A 6 - pole 3 - phase induction motor takes 21 A and 1·55 kW when running unloaded on a 440 volt 3 - phase 50 c/s

supply : With the rotor locked and the stator input voltage reduced to 110 V, the current taken is 60 A and the power input is 8.3 kW: The friction loss is known to be 400 W and the resistance of the delta connected stator is 0.45 ohm / phase :

Construct the cirlce diagram for thc motor on squared paper and obtain from it the input current and power factor when the motor is delivering 50 b. h. p: Determine also the maximum torque developed with the rotor short - circuited and the speed at which this is obtained .

32. A 40 H.P. 500 V, 6 pole, 3 phase, 50 c / s delta connected induction motor gave the following test results : No load — line voltage 500 V, line current 18 A, total input 1200 W· Short cirrcuit - 250 V (line value), line current 100 A, total input 11000 W.

The resistance per phase of the stator winding io 0 . 6 ohm and of the rotor winding 0.15 ohm. The stator to rotor turns ratio is 2. Draw the circle diagram and find (a) the full load line current and power factor, (b) t he maximum output and the maximum torque , (c) the starting torque with the rotor short circuited .

33. A 3 - phnse, 300 H.P, 50 cycles / sec., 20 poles, 3000 volt induction motor has the stator winding connected in star and the rotor winding in delta .

There are 180 slots and 10 conductors per slot on the stator and 240 slots and 2 conductors per slot on the rotor. Neglecting the drops due to the stator resistance, and leakage

reactance, calculate the flux per pole, rotor E.M F. when stati - onary and when runnin with a slip of 2% .

34. A 3 - phase, 50 cycles / sec., 500 volt slip ring induction motor has both stator and rotor windings star connocted, the ratio of rotor to stator turns being 0·7. The stator resistance per phase is 0·2 ohms and its leakage inductance per phase is 0.003 H. Determine, neglecting stator resistance and leakage reactance as Well as the magnetising current ;

a) The rotor current, power factor, torque and torque angle during starting on normal voltage with the slip rings short circuited .

b) The stator and rotor currents and power factor for full load and slip of 3%

c) The external resistance per rotor phase to obtain a starting current of 60 amp. in the stator .

35. For a 25 — H.P, 230 volt, 3 — phase, 60 cycles / sec squirrel — cage induction motor operated at rated voltage and frequency, the rotor copper loss at max. torque is 9 times that at full load torque, and the slip at full — load torque is 0.03. Stator resistance and rotational losses may bo neglected and the reactances and rotor resistance assumed to be costant . Find :

a) The slip at max. torque .

b) The ratio of max. torque to full load torque .

c) The ratio of the starting torque to the full load torque.

36. A squirrel cage induction motor runs at a alip of 5% at full load. The motor current at starting is 5 times the rotor

current at full load. The rotor resistance is independent of rotor frequency, and rotational losses. stray load losses and stator resistance may be neglected .

a) Compute the ratio of the starting torque to the full load torque .

b) Compute the ratio of the max. torque to full load torque and the slip at which max. torque occurrs .

37 A 3 - phase induction motor has a full load current of 100 amp. at 440 volt.

A no — load and a short circuit tests carried out on this motor gave the tollowing results :

	Terminal voltage (volts)	Line current (amp)	p.f.
No — load :	440	30	30%
Short — circuit :	120	150	40%

Find :

a) The full - load slip, p.f., efficiency.

b) Max. p.f. and max. output horse - power .

c) If it is required to limit the starting current of this motor to 200% of the full - load value bo means of ;

i) Reducing the supply voltage .

ii) Inserting additional rotor resistance .

Find the ratio of the starting torques obtained by the two methods.

Assume stator and rotor copper losses to be equal at short circuit .

38. A 400 H.P, 3000 V, 3 phase, 50 c/s, slip ring induction

motor has a synchronous speed of 750 r.p,m. The stator and rotor Windings are star connected and have the following particulars:- turns per phase : stator 240, rotor 46; resistance per phase : stator 0.8 ohm, rotor 0.03 ohm; reactance per phase : stator 4. 2 ohms, rotor 6.1 ohm. The magnetising current is 18 amps and the total no load losses are 8.5 KW. Draw the circle diagram and determine from it :

(a) the full load current and power factor.

(b) the starting torque and the ratio of maximum to full load torque .

39. A certain 3 phase, 12 pole induction motor is rated 400 H.P, 2 00 V and 50 c/s. At no load with rated voltage and frequency, the line current is 20 Arand the power input is 14 KW. The stator and rotor windings are star connected and have the following particulars : Turns per phase, stator 108, rotor 36, Resistauce per phase stator 0.5 ohm, rotor 00.55 ohm :

Reactance per phase, stator 1.9 ohm, rotor 0.22 ohm, Draw the circle diagram and find from it the full load current and power factor. Find also the maximum torque and the speed at which it occurs :

40. The following data refer to the design of a 100 H. P., 50 c/s, 8 pole, 500 V, slip ring induction motor with 3 phase, star connected stator winding : - turns per phase : stator 54. rotor 35. Resistance per phase: stator 0.062 ohm, rotor 0.019 ohm. Reactance per phase : stator 0.21 ohm. rotor 0 064 ohm. Magnetising current 36 amps per phase. Iron, friction and Wiudage losses 2250 W. Draw the circle diagram and deduce from it the line current and power factor. Find also the maximum output, the maximum and starting torques.

41. A 10 H. P, 110 V, 50 c/s, 4 pole, 3 phase, stat connected iuduction motor gave the following test results :

No load : line voltage I10 V, line current 21 amps, power input 650 W. Short citcuit : line voltage 24 V, line curreut 51 amps, power input 1040 W. Draw the circle diagram and find the full load line current, power factor and the maximum torque. Assume equal stator and referred rotor resistances.

42. The following data refer to a 60 H.P., 3 phase, 6 pole, 50 c/s, 380 V slip ring induction motor with the stator and rotor windings star connected : turns per phase, staror 72, rotor 40, resistance per phase, stator 0·052 ohm, rotor 0.016 ohm. reacta--nce per phase stator 0.18 ohm. rotor 0.03 ohm, no load current 30 amps at 0.13 power factor. Draw the circle diagram and determine from it the full load current and power factor. Find also the starting and maximum torques.

43. A 40 H.P., 500 volt, 6 pole, 3 phase 50 c/s, mesh connected induction motor has a ratio stator to rotor turns of 2. The no load and short circuit test data (line values) are :

No load : 500 volts, 16 amps., power factor 0.08.

Short citcuit : 250 volts, 100 amps., power factor 0.25.

The stator and rotor resistances per phase are 0·6 ohm and 0.15 ohm respectively. Draw the circle diagram and find : (a) the full load line current and power factor, (b) the starting torque.

44. Draw the circle diagram of a 10 — hp, 200 — V, 50 c/s. 3 — phase, slip — ring induction motor with a star — connected stator and rotor, a winding ratio of unity, a stator

resistance of 0.38 ohm / phase and a rotor resistance of 0.24 ohm/ phase. The following are test readings :

No - load : 200V, 7 7 A, cos $\phi_0 = 0.191$.

shotr - circuit : 100V, 47.6A, cosϕ_s = 0.454 .

Find : (a) starting torque .

(b) maximum torque in synchronons watts .

(c) the maximum power factor .

(d) the slip for maximum torque and .

(e) the maximum output .

45. The following particulars apply to a 3 - phase, 1000 hp, 2500 - V induction motor with stator and rotor windings star — connected :

Turns / phase : stator 210, rotor 50 .

Resistance / phase : stator 0.5 ohm, rotor 0.02 ohm

Leakage rectancc / phase : Srator 2 ohm. rotor 0.058 ohm

Magnetising current : 45 Amp.

Total no - load loss : 21. 65 KW

Draw to scale the circle diagram and determine the current, power factor, efficieney and slip at full — load and also the starting torque with full - load applied (expressed as a percentage of full - load torque) .

49. Indicate briefly how the vector voltages or currents in an unbalned 3 - phase system can be analysed in terms of three systems of balanced vectors having positive, negative and zero phase - sequenccs. What circuit conditions determine in general the presence or absence of the zero sequence component ? .

Analyse the following three unbalanced voltages into their sequence components :

$V_R = 1500 / \underline{120^0}$ $V_Y = 500 / \underline{60^0}$ $V_B = 1000/\underline{0}$

Verify your result by reconstrucring V_Y grapically from the components .(L.U.)

47. A50 h.p., 440V, 3 - phase synchronous - induction motor has as a plain induction motor a full - load power factor of 0.8 and an efficieney of 0.82 per cent, its light - running cnrrent being 28 A at 0.15 power factor. The torque line on its circle diagram is at 10 degrees to the diameter of the circle. The motor is run as a synchronous - induction motor and the excitation is adjusted so that the full - load torque is developed at 0.9 leading power factor. Estimate the stator current which has the same fluo - producing ability as the actual d.c. excitation of the motor. what will the ratio of the maximum input to the full - load input be for this excitation ? . (L.U)

48. A 4 - pole, 3 - phase. 50 c/s cage rotor has 51 bars. The stator winding is star - connected. The full - load stator current is 17.5 A at 0.85 power factor and the no - load stator current is 6. 5 A at 0.15 power factor. There are 1008 stator conductors in 48 slots. Estimate the current in each rotor bar and end ring at full load, justifying any expression used . (L.U.)

49. (a) The following methods for obtaining variable speed drives are used in practice :

(i) The scherbius cascade .

(ii) The Kraimer cascade .

(iii) The Ward Leonard system of control .

Give a connection diagram for each of them and explain briefly how the variable speed is obtained in each case. What

are the factors which are taken into considera ion when choosing one of these drives ? Give exan ples from actual practice .

(b) A 12 pole induction motor, with 6 slip rings, has a standstill rotor voltage of 600 V per phase. Together with a rotary ocnvertor and a mot r generator it forms a scherbius cascade. The motor generator consists of a D.C motor with a maximu E.M.F. of 500 V and an alternator. Find the lowest no load speed of the induction motor .

50. Draw a sketch showing the main parts and the different windings of the Schrage motor. Indicate the functicn of each winding and explain briefly how the speed of the motor could be varied over a wide range

A 50 c/s, 6 - pole Schrage motor has a maximum voltage of 18 volts between the brushes of each pair on the commutaor. The voltage induced in each phase of the stator winding at standstill is 36 volts. Assuming ideal conditions find the lowest and highest no load speed of the motor .

15. A 3 - phase induction motor has a 10 pole, star connected stator winding, which is fed from a 2000 volt, 50 c/s supply. The rotor resistance is 0.023 ohm and reactance 0.16 ohm per phase. The ratio af stator to rotor turns is 5.5. The stator has a resistance of 0 7 ohm ond reactance of 4 ohms per phase. The motor takes a current of 15 amperes at 0.07 power factor on no lcad when connected to the same supply .

Draw the circle di.gram and determine from it the line Current and power factor for an output of 147 horse power. Determine also the starting torque and the value of the resistance which must be added to each rotor phase to obtain maximum torque at starting .

52. The following particulars apply to a 3 phase, 1000 H.P. 3000 V induction motor with stator and rotor windings star connected :

turns per phase stator 210, rotor 50 .

resistance per phase stator 0.35 ohm, rotor 0.020 ohm .

leakage reactance per phase stator 2.0 ohms, rotor 0.058 ohm .

Total iron loss 6.0 KW, friction and windage 4.0 KW magnetising current 50 amperes .

Draw clearly to scale the circle diagram and determine the current, power factor, efficiency and slip at full load, also the starting torque with full voltage applied (expressed as a percentage of full load torque.) (L. U.) .

53. An 1100 V, 50 – c/s, 3– phase, mesh – connected induction motor has an efficieny of 90% and a power factor of 0.85 when supplying a mechanical load of 600 hp.

An 1100 V, 50 - c/s, 3 – phase, star – connected synchronous motor has an efficiency of 87% and is to supply 100 hp. It is to be connected in parallel with the above induction motor and operated at such a leading power factor as to make the overall power factor 0.95 lagging.

Determine the power factor of the synchronous motor, the induction motor, the phase current of the synchronous motor and the equivalent capacitance per phase of the synchronous motor. (L.U.)

54. Show analytically how the vector voltages or currents in an unbalanced 3 – phase system can be expressed in terms of

three systems of balanced vectors having positive, negative and zero phase - sequences .

Calculate the unbalanced current vectors represented by the three sequence components :

$$I_{+} = 350 \angle 213^0, \; I_{-} = 82.5 \angle 156^0, \; I_{o} = 167.5 \angle 139^0.$$

Verify your result by analysing the resultant vectors graphically into the original components . L.U.

55. The results of load test on a $\frac{1}{4}$ HP, 60 C/S, 4 poles, single phase induction motor are as follows: Applied voltage = 115 volts, at 60 C/S, main winding current = 3.7 amp., and power input = 270 watts. The auxiliary winding was open circuited during this test. The main winding resistance r_1 = 2 ohms and the backward resistance during this test R_b = 1.5 ohms. Compute the net internal torque for the conditions of the load test. Express the torque in NW - mt. and neglect rotational losses .

56. From the following test data find the equivalent circuit parametes at 70^0 C and no - load rotational losses. The data apply to a $\frac{1}{4}$ HP, 110 volts, 50 c/s, 4 poles, single - phase induction motor :

No - load test : V = 110 V, I = 2.73 amp., input power = 56 watts.

Blocked rotor test: V = 110V. I = 16.6 amp., input power = 1260 W.

Resistance of main winding after no - load test is 1.46 ohms, after blocked rotor test is 1.47 ohms and at normal working temperature is 1.5 ohms .

57. A $\frac{1}{4}$ HP, 4 poles, 110 - volts, 6 C/S, single - phase induction motor, whose constants are given below :

R_1 = 1.86 ohms . X_1 = 2 56 ohms .

Rotor refered resistance $2R_2$ = 3.66 ohms .

» » reactance $2X_2$ = 2.56 ohms .

and magnetizing reactance $2X_m$ = 53.5 ohms .

core losses = 35 watts .

Friction and windage = 13.5 watts .

Find the mechanical power ouput, torque, effieiency and power factor at a slip of 0.05.

58. Find the main dimensions and arrange suitable stator windings giving proper dimensions of the slots for the following 3 - phase induction motors :

1 — 500 KW, 6000 V, 50 Hz, 125 r.p m., $\cos\phi = 0.7$,

$\eta = 0.9$, B = 4350 Gauss, τ_p = 17. 1 cms, δ = 2.94 amps/mm^2

AC = 407 ampcond/cm

2 — 8.11 HP, 380 V, 50 HZ, 1500 r.p.m., $\cos\phi = 0.86$

$\eta = 0.85$, B = 5320 Gauss, AC = 234, $\frac{l_i}{\tau_p} = 0.88$

δ = 4.1 amps / mm2.

59. A 3 - Phase, 10 pole, 50,c/s star connected induction motor has a flux per pole of 2.42 megalines and a magnetic circuit having the following particulars : Core length 25 cms including 3 ducts each 1.0 cm wide, the stator has 90 paralle sided slots each 1.0

:m wide and 4.2 cms deep and containing 15 conductors; stator bore diameter 65 cms, gap length 0.9 mm and gap coeffic - ient 1.15. The rotor has 60 perallel sided slots each 0.7 cm wid 3.5 cms deep. Stator and rotor core depths 5.3 cms. Ironfactor 0.9 .

Estimate the magnetising current of the motor, using the following curve for ordinary steel sheets ,

H	ampturns/cm	0	1	2	5	8	12	20	40	60
B	Kilo lines/cm	0	4.3	8	11 5	ı3	14	15	16 2	17

60. Derive an exprssion relaing the currents in the end rings with those in the conductors in the slots of the cage of an induction motor.

Use the expression to determine the full - load current in the end rings of the cage rotor of a 4 - pole induction motor. The cage has 51 bars and full - load ampere - condutors of the rotor are 23000. (L.U.)

61. A 3 - phase, 6 - poles, 535 horsepower star connected induction motor is to be operated from 3000 V, 50 Hz supply at 0.89 power factor and with an efficiency 0.94. Assuming mean specific magnetic loading 4500 Gauss, specific electric loading 384 amp. cond./cm, winding factor 0.95 and rat o armature length to pole pitch lenhth 1.8, find the main dimensions of the motor.

Assume $K_w = 0.95$.

For a total number of armature slots 72, an effective gap length 2 mms and a slot 1.2 cm wide and 6 cms deep, find the magnetising current for the motor, assuming total number of ampere turns per pole equal to 1.2 times the ampere turns for

the air graap and amature teeth. Use the following magnesation curve for iron

H amp. turns/cm	0	100	350	600
B Kilo Gauss	0	16	21	22

62. The magnetic circuit of a 440 volt, 6 pole, 50 c/s, 3 phase, star connected induction motor has the following particullars: co e length 15 cms (excluding ducts); the stator has 72 parallel sided slots, each 1.13 cm wide 3 cm deep and containing 8 conductors. Stator bore diameter 40 cm/s gap effetive length 0.9 mm. The rotor has 49 slots; rotor teeth length 1.5 cms. width at one third from root 1.05 cms. Stator and rotor core depths 6.5 oms. Neglectiug voltage drop, estimate the magnetizing current using the following curve for ordinary steel sheets :

amp. turns/cm	0	1	2	5	8	12	20	40	60
B kilo lines/cm^2	0	4.3	8	11.5	13	14	15	16.2	17

Use an iron factor of 0.9

63. A 4-pole D.C. shunt motor is used separately excited for rheostatic braking of its connected load Determine the time taken to reduce the speed from 120 to 4 r.p.m. assuming the following data : field flux constant at 2.2 Megalines ; Maximum allowable value of the amature current 350 amps. which is kept constant during braking until all external resistance is cut out. The armature is wave connected with 294 armature conductors. The flywheel moment of the armature and connected load is 1400 Kgm^2 : armature circuit resistance 0.03 ohm.

64. A 500 V, D.C. shunt motor has an armature resistance of 0.04 ohm and with full field an e.m.f. of 492 V at a speed of 1000 r.p.m. It is coupled to an overhauling load with a torque of 28.5 Kg.m. Determide the lowest speed at which the motor can hold the load by regnerative braking.

65. The following gives the magnetisati n curve of a D.C. seres motsr. which is straight up to a field cureent of 10 A.

Field Current	10	20	30	40	50	60	70	80	amps.
e m.f. at 600 r.p.m.	128	234	300	340	366	388	404	420	Volts.

Calculat and plot the speeed to torque characteristcis when it is used for rheostatic braking with a total circuit resistance of

(a) 1.5 ohm (b) 4 ohm.

66. AD.C. shunt motor has a magnetisation curve as follows :

Field Current	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20	22.5	25.A
e.m.f at 1200 r.p.m.	50	100	147	180	205	220	232	242	250	258V

The armature resistanee is 0.05 ohm and the field winding resistance 10 ohms.

Plot the speed/torque curve when the motor is used for rheostatic braking with a load resistance of

(a) 1 ohm (b) 2 ohm

67. An electric drive for raising a weight of 1200 Kg. at a uniform velocity of 0.9 m/sec. with an efficiency of 0.82, the motor is 3-phase, Squirrel cage, delta connected, supplied from 380 V supply at 0.85 power factor, and has an efficiencyof0.87. Find the line and phase currents of the motor.

68. The speed of the motor in an electric drive drops from the no load speed of 980 to 920 r.p.m. in 1.25 sec. after the motor has been disconnected from the supply. The no load power input to the mo.or is 2.8KW. and the efficiency at the specific load is 0.78. The load runs at a speed which is half that of the

motor. Find the equivalent fly wheel moment of the drive referred to the rotor shaft.

69. The squirrel cage induction motor in an electric drive is rated at 8KW and 965 r.p.m. The motor is started by using a star delta switch and has a short circuit current which is 5 times the full load current. The ratio of motor resistance to standstill reactance per phase is 0.1. If the motor is started against half the full load torque and the total equivalent fly-wheel moment of the drive referred to the motor shaft is 15 Kgm^2. Find an approximate value of the starting time.

70. Select the proper motor for moving a crane weighing totally 25 tons at a speed 1 m/sec. The motor should develop a torque of at least twice the value of the rated torque at the speed 900 r.p.m. The crane rollers have a diameter of D_r = 700 mms and the journal of the roller axles have diameter d_j = 80 mms. The maximum length of the crane run is L = 45 ms. Determine the lowest speed at which the motor can hold the load by regenerative braking.

71. State briefly the possible functions of the damper-winding in a big synchronous motor. Show how the construction of this winding is adapted to suit such functions.

A 16-pole synchronous motor, which is connected to a 60 Hz supply is rated 3500 KW at 0.95 power-factor and has an efficiency of 97%. GD^2 of the motor and load is 90 ton-m^2 and $i_f = 2\, i_{sc}$. The weight of steel in the rotor damper winding is

300 Kgs with a specific heat equivalent of 482 Joules/Kg – 1°C. The motor drives a one-cylinder double cating compressor, which requires a power of 3000 KW. The torque-time curve of the compressor contains a first harmonic of ± 10% and a second harmouic of ± 20 %. Calculate the temperatnre rise of the damper-wirding at the end of the starting period and find the first and second harmonic of the pulsating power input to the motor, when it is running with the compressor on full load.

72 A 4-pole, D.C. shunt motor, which is rated 60 HP, and supplied from 110 V mains, with an efficiency of 0.9 runs at full load at a speed of 500 r.p.m. The armature of the motor is dieconnected from the supply and switched over to an external resistance, arranged for rheostatic braking, which will keep the current constant at its full load value, while it is being cut out gradually from the amature circuit until it is snort circuited. The armature is wave connected with 306 conductors, and total circuit resistance of 0.02 ohm.

Assnming the motor to be separately excited during the period of braking, with the flux per pole constant at the full load value, find the initial value of the resistance required and the time of braking down to a speed of 5 r.p.m. Total equivalent flywheel moment referred to motor shaft is 940 $Kg.m.^2$

73. Deduce an expression for the equivalent total fly-wheel moment of an electric drive $(GD^2)_d$ refered to tne motor shaft, assuming the load of weight W be moved with uniform linear velocity v. Describe briefly an experiment for determining this value.

74. Differentiate between constant power and constant torque drives, giving examples with two variable speed cascade connections, in which the main drive is on the shaft of a 3-phase slip-ring induction motor. Name two types of industry iu which these drives are used with abvantage, explaining briefly why.

75 Explain briefly the reasons why a synchronous motor should be equipped with a damper winding.

A 2000 HP, 24 pole synchronous motor has an efficiency of 0.96 aud a power factor of 0.94 when connected to 50 Hz infinite bus bars. The equivalent fly wheel moment of the rotor and load together is 65 tm^2 and the short circuit reactance is 57 %. Find the weight of steel in the rotor damper winding if its temperature rise at the end of the starting period should not exceed 150^0 C. Use a specific heat equivalent for steel of 432 Joules/Kg. 1^0C.

If the load on the motor constitutes a one cylinder double acting compressor, which requires a power of 1800 HP, and whose torque – time curve contains a first harmonic of $\pm$ 12% and a second harmonic of $\pm$ 25 %, find the first and second harmonics of the pulsating power input to the motor.

76. Explain briefly, aided with a connection diagram, how dynamic braking is effected in the case of direct current motors

A 4-pole, D.C. shunt motor, which is rated 60 HP, and supplied from 110 V mains, with an efficiency of 0.9, runs at full load at a speed of 500 r,p.m. The armature of the motor

is disconnected from the supply and switched over to an external resistance, arranged for rheostatic braking, which will keep the current constant at its full load value, while it is being cut out gradually from the armature circuit until it is short circutted. The armature is wave connected with 306 conductors, and total circuit resistance of 0.02 ohm.

Assuming the motor to be separately excited during the period of braking, with the flux per pole constant at the full load value, find the initial value of the resistance requirred, and the time of braking down to a speed of 5 r.p.m. Total equivalent flyweel moment refered to motor shaft is 940 Kg.m^2

77. A.D.C. shunt motor has a lap wound armature with 288 conductors and is fed from 220 Volt supply. The total armature circuit resistance is 0.06 ohm and the shunt field winding resistance is 17.6 ohms. The motor has the following magnetisation curve at 1000 r.p.m.

Field current I_f (ams)	2.5	5	7.5	10	12,5	15	17.5	20
Flux per pole ϕ (mega-lines)	1 04	2.08	3.06	3.74	4.27	4.58	4.83	5.01

If reverse current braking is used and the armature current is not to exceed 2 5 amps while braking, find the value of the suitable resistance to be used and the time taken for braking the motor speed from 950 to 400 r.p.m. Assume an equivalent fly wheel moment for the armature and load together of 350Kgm^2 Find also the values of energy supplied to the resistance from the motor kinetic energy and from the supply.

78. Discuss the question of rotationa inertal in connection with electric tractiou. Indicate briefly the calculations involved.

A 4-car electric suburban train has an initial acceleration of 1.8 m.p.h./s. Each coach runs on 2 bogies. The total weight of a loaded motor bogie is 26 tons and of a trailing bogie 14 tons. Allowing 10 % for rotational inertia, a tractive resistance of 6 Ib/ton and a minimum adhesion coefficient of 0.15, find the minimum number of motor begies required. Ignore any effects of weight transfer in the bogie suspension, and justify any formulae used. (L.U.)

79. Define the term specific energy output as applied to an electric train service.

An electric train accelerates from rest up a gradient of 1 in 56 for half a mile and then on level track until a speed of 60 m.p.h. is reached. Acceleration may be taken as constant at 0.5 m.p.h./s. throught this period. Power is then shut off and the train is brought to a standstill one mile further on. Calculate the specific energy output for the run. Allow 10% of the train weight for rotational inertia and 10 lb/ton for tractive resistance. Derive any formulae used: (L.U.)

80 A 150 ton train is equipped with 4 motors each rated 350 HP at 746 r.p.m. The motors develop constant troque in the starting period , which amount to 1.1 times their rated value, until th train reaches its maximum speed. The supply is then shut off and a coasting period follows until braking begins. Braking is made during 10 seconds at a rate of 3.5 Km.p.h.p.s.

until the train finaly stops at the next station. The train travels the distance between the stations with a down gradient of 0.1 per cent in 130 seconds. Determine the value of the maximum speed attained during the run, the distance between the two stations and the total energy supplied to the driving wheels, assuming the following data : driving wheel diameter d= 1020 mms; gear box ratio and efficiency $\varepsilon = 3.5$, $\eta = 0.96$ effective weight 1.1 times dead weight, constant train resistance 4 kgs per ton.

81. Why are motors with series characteristics generally used for traction purposes?

A train weighing 200 tons is accelerated uniformly from rest to a speed of 45 Km/h up a uniform gradient of 1 in 500, the time taken being 30 seconds. The power is then cut off and the train coasts down a uniform gradient of 1 in 1000 for a period of 40 second, when the brakes are applied for a period of 15 seconds so as to bring the train uniformly to rest on this gradient. The train stays 20 seconds at the station. Calculate:

a) The maximum power output from the driving axles.

b) The energy taken from the conductor rails in KWH.

c) The schedule speed of the train.

Assume constant tractive resistance of 4.5 Kg/ton, energy efficiency during acceleratien 60% and allow 10 percent for rotational inertia.

82. A 250 ton train has a gross tractive effort of 16790 Kgs

which may be assumed constant during the acceleration period until maximum speed is reached. the supply is then shut off and a coasting period follows until braking begins. Braking retardation is made at a rate of 3.5 km.p.h.p.s. during 10 seconds until the train travels the distance between the two stations, with an up-gradient of 0.066 percent in 130 seconds. Determine the value of the maxium speed attained during the run, the distance besween the two stations in kms and the total energy supplied to the driving wheels.

Assume an effective weight for the train of 1.1 its dead weight and a constant train resistance of 4 kgs per ton.

83. Why are motors with series characteristics generally used for traction purpose?

Ad.c. series traction motor has the following characteristics:

Current (amps)	100	200	300	400
Speed (Km/h)	66	45	87.3	34.3
Tractive effort (Kgs)	290	852	1517	2233

Determine the approximate speeds and tractive efforts for the above currents if the motor is operated at the same voltage but with 30% of the field turns cut out.

84. The bogie of a motor-coach is equipped with motors each having characteristics as given in problem (1), which apply to 1066 mms wheels. If the wheels driven by one motor (A) are 1040 mms diameter and those driven by the other

motor (B) are 1015 mms diameter, determine. when the motors are operating in parallel and the train speed is 48.5 Km/h, (i) the current input to each motor, (ii) the output at each driving-axle.

85. An electric train maintains a schedule speed of 45 Km/h between stations situated 4.8 Kms apart, with station stop 30 secs. The acceleration is 2.5 Km.p.h./sec. and the braking retardation is 3.2 Km.p.h.p.s. Assuming a simplified rectilinear speed time curve, calculate (a) the maximum speed of the train (b) the energy output of the motors in Wh. per ton, if the tractive resistance is 4.5 Kgs per ton.

86. A 250 ton electric train has an average speed of 51.5 Kms/h between stations on the level situated 2 Kms apart. The acceleration at starting is 2 Km.p.h.p.s. and the braking retardation is 3.7 Km.p.h. /sec. Assuming trapezoidal speed - time curve and a free running speed 30 % higher than the average speed, calculate the specific energy consumption for the run in wh. per ton Kg. and the power in KW usefully employed at the end of the period of acceleration and during coasting. Assume a train resistance of 5.5 Kgs/ton and allow 10% for the effect of rotational intertia.

87. A 130-ton train is equipped with four motors, the characteristics of each at normal voltage are as follows:

Current (amps)	100	200	300	400
Train speed (Km.p.h.)	104.5	58.7	47.9	42.6
Tractive effort (Kgs)	147	618	1220	1830

Calculate and draw the speed-time curve and find the value of the r.m.s. current per motor for the run, assuming the following data :

Constant train resistance of 4.5 Kgs/ton: accelerating weight of the train 10% greater than the dead weight ; braking retardation at the rate of 3.5 Km.p.h./sec. constant supply current of 1600 amps. during theostatic acceleration : maximum speed attained during the run 60 Km/h : the track runs with an upgrade of 0.1 percent. Time of run 100 seconds.

88 Explain, aided with a connection diagram, how we can arrange two identical slip ring induction motors in a selsyn connection (electrical shaft) for the transmission of torque at a certain speed. How could the system function at synchronous speed.

A selsyn connection of the above type uses two identical 6 pole, slip ring induction motors connected to a 60 Hz, 1200 V supply. The power to be transmitted is 50 KW at 480 r.p.m. Find the powers following between the slip rings of the motors, as well as the supply currents for both directions of rotation with respect to the magnetic field. Assume a power factor of 0.8 for both machines.

المراجع

(REFRENCES)

1 Wagner, C.F., and Evans, R:D.: ' Symmetrical components, (Mc Graw-Hill, New York and London 1933).

2. Langsdrof, A.S.:' Theory of alternating current machinery," (Mc Graw-Hill, New York and London 1937).

3. Bödefeld und Sequenz : "Elektrische Madhinen," Springer Verlag, Wien.

4. Richter : " Elektrische Machinen" Verlag Birkhauser, Basel.

5. Nürnberg, W. : " Die Asynchronmachine, " Springer - Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1952.

6. Still, A., and Siskind, C.S. : "Elements of Electrical Machine Design" Mc Graw Hill Book Company, Inc.

7. Lehmann, W. :"Elektrotechnik und elektrische Antriebe," Springer Verlag 1959.

8. Fitzgerald, A.E., and Kingsley, C. (JR.): " Electric Machinery, " Mc Graw-Hill Book Company, Inc. 1961.

9. Hancock, N.N. : Electric Power Utilisation, Sir Isaac Pitman aud Sons Ltd., London 1967

10. Say, M.G. : "Alternating current Machines, " Pitman Publishing 1976

١١ — هندسة الآلات الكهربية ، تأليف الدكتور محمد احمد قمر ، الناشر منشأة المعارف بالاسكندرية (جلال حزى وشركاه)

١٢ — نظريات وتصميم الآلات الكهربية، تأليف الدكتور محمد أحمد قمر، الناشر منشأة المعارف بالاسكندرية (جلال حزى وشركاه)

13. Kamar, M.A. : " The Induction Motor as a Brake with D·C. Excitation," M. Sc. Degree disertation, Faculty of Engineering, Alexandria University, 1951.

14. Kamar, M.A, : '' Investigation of the transient period occuring when one supply line to a loaded 3-phase Induction Motor is interrupted," The Bulletin of the Faculty of Engineering, Alexandria University,1963.

15. Kamar, M.A. : Systematic Method for drawing Vector diagrams of Induction Machines, also with injected secondary voltage, " The Bulletion of the Faculty of Engineering, Alexandria University, 1965

16. Kamar, M.A: :''Speed regulation of Induction Motors by using D.C. Exitation," the Bulletin of the Faculty of Engineering, Alexandria University, 1965.

17. Kamar, M.A. :''Braking of 3-phase Indnction Motors by using unsymmetrical connections and proper rotor resistances, " the Bulletin of the Faculty of Engineering, Alexandria University 1968.

18 Chalmers, B.J., and Bennington, B.J., ''Digital computer program for design synthesis of large squirrel-cage induction motors" Proc. IEE, 1967, 114, (2), p. 261 - 268.

19. Fultou, N.N., Slater, R.D., and Wood, W.S., "Design optimisation of small 3-phase induction motors," Proc. IEE,1976, 123, (2) , p 141 - 144.

20. Kamar, M.A. : "Speed Regulation of 3-phase Induction Motors using unsymmetrical connections. The B.O.F.E., A.U.

21. Kamar, M.A., Hamdi, A., and Nosseir, A.: "Behaviour of a 3-phase 50 Hz Iuduction Motor operated on a 60 Hz Supply, " the Bulletin of the Eaculty of Engineering, Alexandria University 1974

22. Laithwaite, E.R. : "Induction machines for special purposes," Newnes 1966

23. Sorial, N.N.: Analysis and high speed control of Linears Induction Motors," M. Sc. Thesis Alexandria University 1971.

محتويات الكتاب

مقدمة الكتاب صفحة

الباب الثانى

صفحة

الباب الثالث

الباب الرابع

صفحة

الباب الخامس

صفحة

الباب السادس

صفحة

الباب السابع

تطبيقات على وسائل التحريك الكهربى

صفحـــة

تصويب الأخطــاء

صفحة	السطر	الخطأ	تصويبه
١٧	٢٢	$I's$	I'_{2s}
٢١	١	$3\ I_{2s}\ R_2$	$3\ I^2_{2s}\ R_2$
٢١	٨	$\because P_{I2}$	$\therefore P_{12}$
٢٣	١٠	$\frac{2\ pE_1}{2\ I_1 f_1 \times 9.81\ X'_{20}}$	$\frac{3\ pE_1^2}{2\ \pi f_1 \times 9.81\ X'_{20}}$
٢٤	الشكل	(P.U. torque)	تحذف
٢٥	٥	$S_m \times 2S_m$	$S_m \times 2\ S_m \propto$
٢٥	٧	$S^2_m + \propto - 252\ m$	$S^2_m + \propto^2 - 2\ S^2_m$
٢٦	١	002	200
٢٧	الشكل	(٥-١١)	(٥ - ١)
٣٤	١٢	X	χ
٣٩	١١	O'a	O'P
٣٩	١٢	O a	OP
٤٠	٨	P_{max}	P_m
٤١	١٣	بالحصول	للحصول
٤٢	الشكل	(٩-١١)	(٩ - ١)
٤٤	٨	$\frac{V_s}{\sqrt{3}\ I_2}$	$\frac{V_s}{\sqrt{3}\ I_s}$
٤٤	٩	R_2	R'_2
٤٩	١٢	ص ١٣٢	ص ٢٣٢
٥٩	١٧	ناقص فى المسألة	F.L.slip 0.02
٧٧	٤	(٤٦ - ١)	(١٧ - ١)
٨١	٩	(٢٥ - ٢) أ	(٥ - ٢) أ
٨٢	٨	$a\ V_{23}$	$a\ V_{31}$
٨٣	١٦	V_n	V_p
٨٤	١١	والخلق نحصل	والخلق كما نحصل
٨٦	١٣	S_{fe}	S_{fl}
٨٦	١٤	I_{fe}	I_{fl}

صفحة	السطر	الخطأ	تصويبه
٨٨	١٧	ض ١٦٨	ص ٢٦٨
٩٠	٦	فى الطرف الايمن من المعادلة $J \omega^2_0$	$\frac{1}{2} J \omega^2_0$
٩٢	٧	57000	57000×1000
٩٧	١٨	I	I_{Ls}
٩٧	٢١	(١ – ٢)	(١٠ – ٢)
١٠٠	١٦	X	$X = \frac{1}{\sqrt{3}}$
١١٦	نهاية الجدول	$P_1 + P_2$	$P_1 - P_2$
١٢٠	٥	باب	كتاب
١٢٣	١٠	المعدلات	المبدلات
١٢٥	١٨	٢٠ إلى ٢٢	٢٣ إلى ٢٥
١٢٧	١٧	I_n	I_u
١٢٩	الشكل (جـ)	المرتحل المرقوم E_2	صحتها E_r
١٣٠	١٠	متأخر	متقدم
١٣٩	٧	b	f_b
١٤٦	١٢	2000	1000
١٤٨	٢	القارات	القطارات
١٤٨	٧	300	800
١٥٤	٢٥ و ٢٦	توجد جمل زائدة ابتداء من (ذى الحلقات) فى السطر ٢٥ حتى (للمحرك من) فى السطر ٢٦	تلغى هذه الجمل الزائدة
١٦٠	١٩	(٥ – ٣)	(٤ – ٣)
١٦٩	أسفل الصفحة	قائمة المراجع رقم (٥)	رقم (٢١)
١٧٠	شكل (٨ – ٣)	وضع الشكل	يدار ٩٠ درجة فى عكس اتجاه عقربى الساعة
١٧٢	١١	I_l	I_h
١٧٣	٦	$<$	$\propto$ (أى تتناسب مع)

السطر	السطر	الخطأ	تصويبه
١٧٣	٩ر١٠	I_1	I_h
١٧٣	٢٠	٥٠ ذبذبة بدلا من ٦٠	٦٠ ذبذبة بدلا من ٥٠
١٧٤	٥	مع ،	، مع
١٧٦	شكل (١٢ ـ ٣)	الشكل مقلوب	يعدل
١٧٨	١١	I_8	I_3
١٧٨	١٧	$j\sqrt{3}$	$-j\sqrt{3}$
١٨١	العنوان	- Phases	— phase
١٨٥	٧ (البسط)	$2\,n_s + n - n$	$2\,n_s + \quad - n_s$
١٩٣	١٢	X_{20}	X_2
١٩٥	١١	مقامه	مقاومة
١٩٥	١٣	(٩ ـ ب)	(٩ ـ ٤) ب
١٩٨	٩	المعادلتين (٧ ـ ٤)، (٧ ـ ٤)	المعادلتين (١٣ ٤)
١٩٩	١١	صغير s	صغر s
٢٠٠	١٨ المعادلة (٤-١٣)	K.g.m.	Watts
٢٠٠	٢٠	(١ ـ ٤)	(٧ ـ ٤)
٢٠١	١	(٢ ـ ٤)	(٩ ـ ٤)
٢٠١	١٤	(٥ ـ ٤)	(١٤ـ٤)
٢٠٣	٥	المراجع	المرجع
٢٠٤	٣	الملف m	الملف a
٢٠٤	٥	E_{of}	E_{af}
٢٠٧	١١	من (٣ ـ ٤) الى (٦ ـ ٤)	من (٤ ـ ٤) الى (١٠ـ٤)
٢٠٧	١٦	1157	117.5
٢٠٧	١٩	5	0.5
٢٠٨	١٠	(١٨ ـ ٤)	(٢٣ ـ ٤)
٢١٦	السطر الأخير	٢٠٠	٢٠٠٠
٢١٧	٩	بعدين	بعديه
٢١٧	٢١	بعد	بعدا
٢٢٣	٩	يجب	لا يجب

صفحة	السطر	الخطأ	تصويبه
٢٢٣	١٥	عمق فى	عمق المجرى فى
٢٢٦	١٩	أ كبر	أ كبر من
٢٢٨	١١	$S\ /2$	$S_2/2$
٢٢٩	٦	$T_1 = g_1\ p z_{s1}$	$T_1 = \frac{1}{3}\ g_1\ p\ z_{s1}$
٢٣١	٧	ضغط	ضعف
٢٣٢	١١	للمقارمة	للمقاومة
٢٣٦	٨	$\lambda_{s2} = C_1 \frac{S}{3\ a} +$	$\lambda_{s1} = 2\ C_1 \frac{S}{3\ a} +$
٢٣٦	١٥	$\lambda_{s1} = C_1 \frac{S}{3\ a} +$	$\lambda_{s1} = 2\ C_1 \frac{S}{3\ a}$
٢٣٨	٤	h_2	h_3
٢٣٩	١	(٥ - ٥)	(٥ - ٥) ا
٢٣٩	شكل(ا) ،(ب)	مقلوبان	يعدلان
٢٤١	٣	X_{2s}	X'_{s2}
٢٤١	المعادلات (٣٠ - ٥) ، (٣١ - ٥) ، (٣٢ - ٥)	ناقص فيها المعامل 10^{-8}	يضرب كل منها فى 10^{-8}
٢٤١	المعادلة(٣٢ -٥)	X_{s2}	X'_{2s}
٢٤٤	المعادلة(٣٧- ٥)	ناقص فيها المعامل 10^{-8}	تضرب فى 10^{-8}
٢٤٩	٢	$q = \frac{72}{3 \times 8}\ \ 3$	$q = \frac{72}{3 \times 8} = 3$
٢٥٠	٩	gad	gap
٢٥٠	١١	1	1.5
٢٥٢	٣	ems	cms
٢٥٢	٦	cnrve	curve
٢٥٢	١٧	$0.3\ B_g l_g k_g$	$0.8\ B_g l_g k_g$
٢٥٢	السطر الاخير	3200	320
٢٥٣	٥	077	0.77

صفحة	السطر	الخطأ	تصويبه
٢٥٤	٣	$2\ .9 \times \frac{4}{3} \times 3.1$	$28.9 - \frac{4}{3} \times 3.1$
٢٥٤	٥ فى المقام	9.58	0.58
٢٥٧	١٩	بالمتغيراب	بالمتغيرات
٢٦٢	١٤	البزييت	التزييت
٢٦٧	٧	بدون حمل	بالحمل
٢٧٣	٤	shant	shunt
٢٧٥	١٧	وهى	و ω هى السرعة الزاويه
٢٧٦	١١	$\frac{T\ \omega}{d\ t}$	$\frac{d\ \omega}{dt}$
٢٧٩	٥	T_I	T_1
٢٧٩	٥	$1\ \varepsilon$	ε_1
٢٨١	المعادلة (١٢-٦)	$= J_m +$	$J_d = J_m +$
٢٨٤	٩	Janles	Joules
٢٨٧	٤	المسافة متر	المسافة h متر
٢٨٩	المعادلة (٢١-٦)	$\times \frac{365\ \eta_0\ P_0}{S_N}$	$= \frac{365\ \ \eta_0\ P_0}{S_N}$
٢٩١	٨	mofotor	of motor
٢٩٢	٦ (المقام)	320	32
٢٩٢	١٧	الدوران. بمفرده	الدوران بمفرده
٢٩٤	١ (المقام)	T	T_1
٢٩٩	قبل الأخير	(٢٧ - ٦) ا	(٢٧ - ٦) ا و ب
٣٠٠	٥	esistance	resistance
٣٠٢	٣ (البسط)	$(0.2)^2$	$(1.2)^2$
٣٠٥	٤	عنوان بدون خط تحته	يوضع تحته خط
٣٢١	٤ و ٥ و ٦	العبارة التى بين قوسين من (قائمة حتى الانزلاقية) وضعها خطأ	تأتى هذه العبارة بعد كلمة الحمل فى السطر ٦

صفحة	السطر	الخطأ	تصويبه
٣٢٤	١ (التكامل الثانى)	$\frac{J}{\omega} d\omega$	$\frac{J}{T} d\omega$
٣٢٤	١ (التكامل الثالث)	$2\ T_m\ \omega_m$	$2\ T_m \propto_m$
٣٣٥	١٥	0965	0. 965
٣٤٨	المعادلة (٩ – ٧)	$+ CW$	$\pm CW$
٣٤٩	١٦	a = 5 Kg/ tons	r = 5 Kgs/ton
٣٥٧	١٦	b = 3.2	b = 3.5
٣٥٨	١	5.4	5.7
٣٥٨	٧	هى	كما هى
٣٦١	٩	كدار	كدالة
٣٦٢	١	تيمة	قيمة
٣٦٣	٥	منتائج	النتائج
٣٦٥	آخر سطر	1.	1.4
٣٦٦	١٣	٣٦	٣٦ر٥
٣٧١	٧	(١٢ – ٧)	(١٢ – ٧) أ
٣٧٦	٦	$\perp^D$	T_D
٣٧٧	١٧	$T_{dI} + T_{dI}$	$T_{DI} + T_{dII}$
٣٨٠	٩	T s	$sT\omega_0$
٣٩٢	٨	10	ı00

الترقيم الدولى ٧٨/٣٦٧٤

رقم الإيداع ٢ - ٠١ - ٧٣٠٧ - ٩٧٧

** تم بحمـــد الله **

طبع على مطابع

رواى للاعلان

العصافرة . اسكندرية

٢٨ / ٤٢٣